

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-316338

(43)Date of publication of application : 16.11.1999

(51)Int.Cl.

G02B 13/00

G06F 17/50

(21)Application number : 11-044161

(71)Applicant : SUMITOMO ELECTRIC IND LTD

(22)Date of filing : 23.02.1999

(72)Inventor : FUSE TAKASHI

(30)Priority

Priority number : 10 69480

Priority date : 03.03.1998

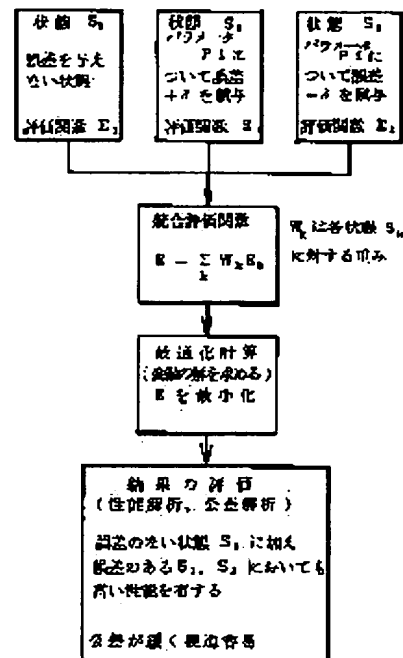
Priority country : JP

## (54) LENS AND METHOD FOR DESIGNING OPTICAL SYSTEM

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To make it possible to determine the parameters of a lens system and optical system which facilitate actual manufacture by making an overall evaluation function obtd. by adding an evaluation function in the state of containing errors to the evaluation function of an errorless state relating to the plural parameters and determining the variable to minimize the same.

SOLUTION: A state  $S_0$  is an ideal state (errorless state) in which an impartation error is not given and the evaluation function is determined as  $E_0$ . The state that the error  $+\delta$  is added to the parameter  $P_i$  in addition thereto is  $S_1$  (error state) and the evaluation function is determined as  $E_1$ . A state  $S_2$  is the state added with the error of  $-\delta$  to the same parameter  $P_i$  and the evaluation function is determined as  $E_2$ . If the parameter  $P_i$  is handled as the variable, the parameter  $P_i$  in the three states is  $P_i$ ,  $P_i \pm \delta$  and varies. The other parameters are commonly changed. The values of all the variables are determined and a wave front aberration or beam aberration, etc., are determined. The value of the overall evaluation function  $= \sum W_k E_k$  is calculated and the set of such variables as to minimize  $E$  is determined.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

19.05.1999

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3006611  
[Date of registration] 26.11.1999  
[Number of appeal against examiner's decision  
of rejection]  
[Date of requesting appeal against examiner's  
decision of rejection]  
[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-316338

(43)公開日 平成11年(1999)11月16日

(51)Int.Cl.<sup>8</sup>

識別記号

F I

G 0 2 B 13/00

G 0 2 B 13/00

G 0 6 F 17/50

G 0 6 F 15/60

6 8 0 A

審査請求 有 請求項の数 1 O L (全 19 頁)

(21)出願番号 特願平11-44161

(22)出願日 平成11年(1999)2月23日

(31)優先権主張番号 特願平10-69480

(32)優先日 平10(1998)3月3日

(33)優先権主張国 日本 (J P)

(71)出願人 000002130

住友電気工業株式会社

大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号

(72)発明者 布施 敬司

大阪府大阪市此花区島屋一丁目1番3号住

友電気工業株式会社大阪製作所内

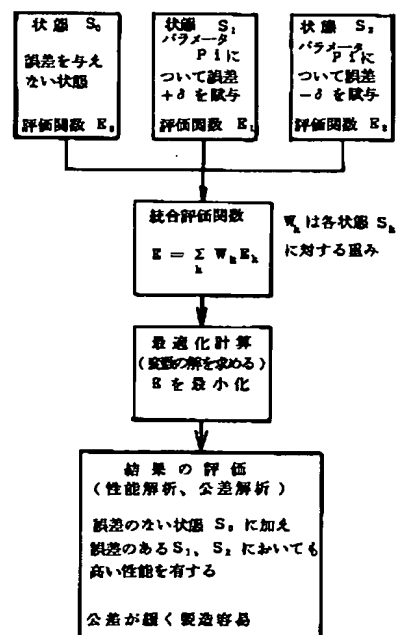
(74)代理人 弁理士 川瀬 茂樹

(54)【発明の名称】 レンズ及び光学系の設計方法

(57)【要約】

【課題】 光学系の変数を決定する際、各点での収差や誤差の2乗の和である評価関数を最小にする値として決定される。しかし公差が考慮されておらず製造困難な変数値を選んでしまう事がある。はじめから公差を十分に大きくできる変数決定の方法を与える。

【解決手段】 光学変数のうちとくに製造誤差が大きくなる変数について $\pm\delta$ の誤差をはじめから賦与した誤差状態を考え、誤差状態の評価関数と、誤差のない評価関数を足し合わせた統合評価関数をつくり、これを最小にするような変数を求める。誤差を賦与した変数については公差が大きくなる。



#### 【特許請求の範囲】

【請求項1】 光学系を決定する全ての光学パラメータに関し誤差の無い状態 $S_0$ のパラメータ組に対する評価関数 $E_0$ と、少なくとも一つの光学パラメータに誤差 $\pm\delta$ の誤差がある状態 $S_1$ 、 $S_2$ …に対する評価関数 $E_1$ 、 $E_2$ …を適当な重みを掛けて加えた評価関数 $E = w_0 E_0 + w_1 E_1 + w_2 E_2 \dots = \sum w_k E_k$ を作り、これを最小にするような光学パラメータの組を求めることを特徴とするレンズ及び光学系の設計方法。

#### 【発明の詳細な説明】

##### 【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は製造容易なレンズや光学系の設計方法に関する。レンズ系などの設計をする際、光学方程式をたててこれを何らかの手段によって解いてレンズ系を決定する全ての光学パラメータの値を求める。これが適当な解であるかどうかを評価する必要がある。評価のために評価関数というものを使う。これは、光線を追跡して像点での位置誤差や波面収差など各点におけるなんらかの誤差の二乗の和である。これが小さい程全体としての誤差が小さい。であるから評価関数を最小にするパラメータを求めてこれを設計値とするのである。設計値の良否を評価できる関数であるから評価関数という。評価関数を最小にする設計値は最も優れた性能を与えるはずである。

【0002】しかし実際には製造誤差がある。誤差のため設計値通りには作れない。そこで最低これだけの性能を与えるには誤差はこれ以下でないといけないう最大誤差の範囲を決める。誤差の許容範囲である。これが公差（TOLERANCE）である。設計値通り製造できた時の性能がいくら優れていても、公差が小さいと製造が難しい。設計性能も優れ公差が大きいというパラメータの組を見つけることが重要である。本発明は公差のより大きい製造容易な光学系の設計方法を与えることを目的とする。

【0003】用語について述べる。レンズや光学系を定義するパラメータには様々なものがあるが、設計する上で、本発明ではその扱われ方に2つの側面があることを説明する。一つの側面は、所望の特性を有するレンズや光学系を設計する上で最適化の計算処理上で変数として扱われるパラメータと、定数として扱われるパラメータがある事である。複数のレンズにより構成される光学系を考える場合、各レンズの厚み、各面の曲率半径、各レンズ間の間隔などのパラメータは、目的の性能を満足するように最適の値を求める計算処理が行われる。このとき変数とはならない他の定数のパラメータは、既定の値のままで一定の値を保つ。例えば、光源からレンズまでの距離、ウインドウの厚みや曲率（＝0）、或いは一部のレンズの形状、レンズ間距離が既定値に固定されるなどの場合、それらは定数として扱われる。レンズの材質により決まる屈折率、分散などの物性値やレンズの枚数

は、通常は最適化の計算中に変数として値を変化させることはできないので、変数ではなく定数である（計算処理の前提条件として扱われる。前提条件の変更として材質や枚数を変える事は可能である）。

【0004】もう一つの側面は、後に述べる様に、賦与誤差を与えるパラメータと、そうでないパラメータである。賦与誤差という言葉は本発明の根本思想であって後にその意味を述べる。公知の概念ではない。全く新規な概念である。しかしここでパラメータの種類について述べておくとのちのち便利であるので賦与誤差によるパラメータの区分についても予め説明する。全てのパラメータは、設計後にそれを製造するとき大なり小なり必ず製造誤差を持つ事になる。レンズの厚み、曲率半径、レンズ間隔などの変数となるパラメータは上記のように最適値が求められたとしても、実際に製造される場合には、厚み誤差、曲率半径誤差、レンズ間隔誤差を持つことになる。一方、定数として扱われるパラメータも同様に誤差を持つ。レンズのウェッジ（楔角）、ディセンタ（軸ズレ、偏心）、ティルト（傾き）、面精度（面の歪み）、屈折率の不均一性などは、純粋に製造誤差を表すパラメータであり、一般には設計上は完全にゼロであることが前提となるパラメータである。本発明では、これら全てのパラメータの中から製造誤差が大きく光学性能を左右するパラメータを選び出して、そのパラメータに積極的に賦与誤差を与えて最適化処理を行う。賦与誤差を与えるパラメータは設計上変数として扱われるパラメータであっても、そうでなくても良い。また、ウェッジ、ディセンタなどのような元々誤差を表すパラメータであってもよい。賦与誤差を与えられたパラメータは通常3つの値を持つことになる。あるパラメータの値 $P$ に賦与誤差 $\pm\delta$ を与えたとすれば、そのパラメータは中心値 $P$ とともに、最大値 $P+\delta$ と最小値 $P-\delta$ の3つの値を持つ。このパラメータが定数であっても変数であっても、賦与誤差の与え方に違いはない。最適化計算中に変数の値が変化すれば、その新たな値を基準に賦与誤差が与えられる。例えば、あるレンズの厚みを変数であって、それに $\pm 0.5\text{ mm}$ の賦与誤差を与える場合、最適化計算処理の途中でその厚みの値が $10\text{ mm}$ であったとすれば、その厚みは中心値 $10\text{ mm}$ と最大値 $10\text{ mm} + 0.5\text{ mm} = 10.5\text{ mm}$ と、最小値 $10\text{ mm} - 0.5\text{ mm} = 9.5\text{ mm}$ の3つの値を有するとして扱われる。計算処理が進んで厚みの値が $11\text{ mm}$ に変わったとしても、同じ $\pm 0.5\text{ mm}$ の賦与誤差が与えられて、その時点で $11\text{ mm}$ 、 $11.5\text{ mm}$ 、 $10.5\text{ mm}$ の3つの値を有しているとして扱われる。以上の意味で、本発明ではパラメータを4つに分類することができる。

1. 変数であり、賦与誤差を与えるパラメータ。
2. 定数であり、賦与誤差を与えるパラメータ。
3. 変数であり、賦与誤差を与えないパラメータ。
4. 定数であり、賦与誤差を与えないパラメータ。

#### 【0005】

【従来の技術】図1によって光学系の設計方法の概略を説明する。レンズ系よりなる光学系を設計するには、レンズの材料（屈折率、分散、吸収係数）、レンズの枚数、球面、非球面などの形状選定、レンズの相対的な配置（レンズ間距離、レンズ像面距離）等のパラメータについて初期値を決定しなければならない。またそれらのパラメータの中で何を変数として解を求めるかを決定する。これが基本構成の設定である。その他に光源の波長、レンズの厚み、材料、全体の寸法などいくつかの拘束条件がある。これらの拘束条件を考慮し、レンズ面での屈折を与える式を立て所望の出力を与えるような条件を課してレンズの厚み、曲率、非球面係数、間隔などの変数の解を計算により求める。即ち方程式を解いた変数の値が解であり、解の集合によって光学系を定義できる。

【0006】しかし多くの場合所定の目的を与える方程式は抽象的で一意的に解を与えることはできない。拘束条件があっても式の数が足らず、解は幾つもある。また方程式自体が非線形であるし、非球面レンズを使う場合はレンズ自体を決める変数も多いのでこれらの式を解析的に解く事ができないのが殆どである。その場合は様々の近似式が使われたり光線解析がなされたりして光学系の変数について解を求める。近似解も幾つもあり得る。レンズ、ミラーによる所望の屈折や反射を与える式を満足する解はしばしば無数にあり、一つの解が直ちに適当なパラメータを与えるということは殆どない。多数の解が求まるがこれからもっとも適当な解の組を見つける必要がある。

【0007】解が適当かどうかを判断するための関数として評価関数というもの考える。これは一般に誤差の二乗を加えたものである。誤差が小さい方が一般には高性能であるからこれによって製品の性能を評価することができる。さらに評価関数を最小にするという条件によって変数を求めることもできる。この発明で評価関数というのは像面のいくつかの点での光学的誤差（収差）の二乗を適当な重みを付けて足し合わせたものである。もちろん収差の種類はいくつもある。そのうち適当な種類の光学誤差（収差）を採用して評価関数を定義する。レンズを含む光学系評価関数は例えば波面収差を評価関数の誤差として採用する。あるいは像面の試験点における光線のズレ（光線収差）を誤差として用いる事もある。評価関数の誤差は適当なものを随時採用する。

【0008】図2は平面波がレンズによって収斂して一点に結像する図を示す。平面波では波面は平面であるが、レンズによって絞られると波面は球面になる。しかし実際には厳密な球面波にならないこともある。図3にそれを示す。理想的な波面と実際の波面は食い違う。この違いが波面収差である。波面収差のために結像点で像が真円からずれる。またスポット径が理想の場合から

外れてくる。真円度の食い違いも誤差の一種である。スポット径の違いも誤差である。だからこれらの誤差を評価関数の誤差として採用する事もできる。

【0009】先ほど求めた解により発生する収差を求め、評価関数を作り、評価関数の値を求める。その値が解の妥当性を評価している。いくつかの解に対して評価関数の値が求められる。そのうち評価関数を最小にする解の組を最適設計値とする。これを最適化計算と呼ぶ。例えば、収差係数  $s_j$  というものを想定し、その目標値を  $s_{j0}$ 、重みを  $w_j$  として、評価関数  $\Phi$  を  $\Phi = \sum w_j (s_j - s_{j0})^2$  とすることがある。収差の2乗誤差として評価関数を定義してこれを最小化する。このように光学方程式から解を求めて評価関数に入れて解を評価するというのが本来の評価関数である。

【0010】しかし光学方程式から解を求めることなくはじめから評価関数によって解を求めることもある。光学系変数（屈折率、厚み、曲率、非球面係数など）のある初期値を与えこれの評価関数を求め、初期値から変数に僅かな変化を与えてその評価関数を求めて、評価関数が減少する方向に変数の変化を与えて行くという漸近的な方法もある。光学変数の具体的な値を仮定すると、光線追跡できるし光線収差や波面収差が計算可能になる。初期値に対して、波面収差、光線収差などを計算しその結果から波面収差や光線収差などの誤差より構成させる評価関数を計算する。解くのではなくて解をはじめから仮定するので光線追跡が可能である。そして初期値に僅かな偏奇を与えて同様に光線追跡して波面収差、光線収差などを求め評価関数を計算する。このように解を次々に仮定してその良否を評価関数によって評価する。

【0011】こうして評価関数を最小にする変数の組を求める。これが最適化計算である。つぎにこの値によって光線や波面の収差がどうなるか、スポットの形状は各点においてどうなるのか？ということシミュレーションする。最適の設計値が決まったので、パラメータを設計値からずらせて理想状態からの性能の低下を調べる。性能低下が許容できる範囲の最大誤差を公差として求める。これが公差解析である。ここまでの基本構成設定、最適化計算、シミュレーション、公差解析などが光学設計である。

【0012】そうして求められた結果に基づいて実際に光学系を作製する。そして実際に性能を調べる。これが試作評価である。実際の性能や、製造コスト、作り易さなどの観点で製品を評価する。評価関数による方法は性能だけを基準に値を選んでおりコストや作り易さ等は考慮されていない。だから試作評価は不可欠である。

【0013】試作評価によって満足のゆくものが得られない場合は、初めに戻って基本構成設定の段階からやり直す。同じ事を繰り返して最終的に最適の変数値（最適解）の組を求める。この段階までの同じような工程を繰り返すので、繰り返し回数が多いと、開発期間が長くな

る。開発費用が増大していく。好ましい事ではない。より速く最適の変数を求めたいものである。

【0014】

【発明が解決しようとする課題】 レンズ系の性能の評価は、収差だけでなく、コストや製作性も考慮にいれなければならない。従来の評価法では、最適と計算された変数あっても、かならずしも製作容易とは限らない。求められたレンズの変数はそれが実現されておれば最適の性能のものを与えるはずである。これを設計性能と呼ぶ。しかし実際には変数とパラメータには製造誤差があるから計算通りのものができない。製造誤差の為に、実際の性能は、設計性能より低い。

【0015】 ここで性能という言葉进行定義する。光学系には様々の特性があるが個々の特性の集合として、性能と言う言葉を使う。個々の特性は計量可能であるが、性能はその集合であるので、当然には計量可能でない。特性のうちどれを重視しどれを軽視するのかが決まらなと性能は計量できないわけである。特性の重みは適当に決められるのでここでは集合特性としての性能は計量可能と考えることができる。それでここでは性能を計量可能な統合的な変数とする。

【0016】 個々の特性は、光学系のパラメータ、変数によって決まる。レンズの厚み、表面裏面の曲率、曲面の係数、レンズ間の距離など変数となるものの数は多い。設計というのは、所定の目的の為のこれらの変数の最適値を決める事である。方程式を満たす変数のことをここでは単に「解」とよぶ。個々の変数について一つの解があり、解の集合が与えられると、設計がなされたということである。

【0017】 光学系には所定の目的があつてこれを達成するような変数について方程式を立て方程式を解くことによって変数の解が求まるのである。ところがしばしば変数の数よりも方程式の数が少ないので方程式を満足する解の組は幾つもある。つまり拘束条件が少ないので、幾つもの解集合がある。であるから一組の解を求めるだけでは設計は終わらない。無限にあるかもしれない解の集合からさらに最適の組を見いださなければならない。これは所定の効果を与える方程式だけからは決まらない。むしろ個々の光学方程式とは無関係に別個の観点から最適値の組を決める事が多い。

【0018】 そのための手段が評価関数である。光線収差や光路差などの光学的誤差の二乗を各点において総和を取ったものであるが、これが小さいと言う事は性能が優れているという事である。現在の評価関数は収差の評価に重点が置かれている。つまり変数の適値が分かたとしてそれらのうち収差を最小にする解を評価関数によって決める。収差はその光学系が所定の目的を完全に達成した場合性能からの実際の性能のズレであるから収差によって、解を評価するのはいかさまもつともである。つまり性能を評価して最高の性能を与える解を、無数の

解からただ一つ卓越したものとして選んでいるので、それは直接的な評価法である。

【0019】 しかしそれは製造容易さという観点から評価されたものではない。最適値の組によって与えられるレンズの形状を実際に作ることができればそれだけの優れた性能が得られるとしても、部品の製造には製造誤差が必ずあるから、製造誤差のために性能が低下する。あるパラメータの製造誤差が致命的であつて僅かな製造誤差であるのに性能が著しく低下してしまう、ということがしばしばある。そうするとそのパラメータについては製造誤差をことさら少なくするように注意を払わなくてはならない。注意しても製造誤差はあるので、検査して許容できる誤差範囲にない製品は不合格とする必要がある。すると歩留まりが低く高コストになる。

【0020】 図4は横軸に光学系変数、縦軸下向きに性能を取ったグラフである。性能を決める光学変数は幾つもあるが簡単のために一つだけとしている。性能も抽象的なものであるが計量可能としている。評価関数を使って最適解を求める場合、例えばロ点を初期値とすると、評価関数を下げる右方向に変数を偏奇させるとハ点に至る。これが評価関数の極小を与えるので最適解だということになる。しかし二点を初期値とすれば変数を少しづつ変えて評価関数を最小にするホ点に至る。これが最適解ということである。チ点を初期値とすると、変数を少しづつ変更してト点に至る。これが最適解ということになる。このように変数の数が多くて拘束条件や屈折条件が少ないので評価関数最小によって求める最適解が幾つもある。しかも最適解は初期値に依存する。すると初期値の選択が重要だということになる。しかし最適の初期値を知る方法はない。

【0021】 もう一つの問題は、最適値の間での優劣を決めるのは性能だけでないということである。性能から言えばホ点がト点より優れている。しかしホ点は極めて狭い谷になっている。ホ点に決めると僅かな製造誤差があつても性能の低下は著しい。ト点は性能はホ点より劣る。しかし広い谷の中にあるからト点に設計値を決めた場合かなりの製造誤差があつても性能が低下しない。さらに初期値がロにある場合は評価関数を下げて到達した最適値はハ点になる。ハ点での製造誤差－性能関係はいっそう緩やかである。実際に光学系を製造する場合何らかの製造誤差がつきものであるから、ホ点を設計値とすると公差が小さいので、なかなか所望の性能のものを作る事は難しい。これに反してト点を設計値とすると多少の製造誤差があつても性能の低下があまりないので製造容易である。ホ点は許容誤差つまり公差が小さいので製造困難である。ト点やハ点は公差が大きいの製造容易である。製造容易と言う観点からいえば性能が最も優れているホ点よりも公差が広いト点やハ点を設計値とする方がよい。

【0022】 どのような最適値に至るか？ということとは

初期値による。しかし初期値だけによるのではなく初期値からどのように変数を動かすかという順序にも依存する。変数を変化させる順序が違えば異なる極小点にいたる。初期値の選択には任意性があり変数変化の順序も多様な自由度がある。評価関数最小ということだけでは公差の広い解に至る事はできない。性能が優れた解に至ったとしても公差が狭いと製造困難である。

【0023】図5に製造誤差と性能の関係を抽象的に示す。最適値 $x_0$ のときに、最大の性能(設計性能)ルが得られる。最適値から製造誤差があると性能が下降する。許される最低の性能(基準値性能)がヌラだとする。性能曲線を基準値が横切る点ヌラでの誤差を公差 $\pm \Delta$ とする。つまり許容される性能降下分に対応する製造誤差 $e$ が公差 $\pm \Delta$ ということになる。性能に影響するパラメータ、変数はたくさんあるので、あるパラメータの公差は大きく、あるパラメータについては小さいという事がある。最適値 $x_0$ からのズレ $e = (x - x_0)$ に対して、性能が急降下する場合もある。そのようなパラメータが存在する場合、そのパラメータについての加工は細心の注意を要求するし注意しても不良品が大量に出る。つまり歩留まりが悪く製造が難しい。

【0024】単位製造誤差に対する性能降下 $dS/d e$ というようなものを抽象的に想定するとはなしが分かりやすくなる。これが大きいパラメータを含む光学系は、理想的な値のものができない限り性能は著しく落ちるので実際には好ましくない。収差によって解の評価を行うだけでは、製造誤差の影響は分からない。そこで最適解が決まった後で、それぞれのパラメータの許容誤差つまり公差が与えられる。同じように厚さが10mmのレンズであったとしても、公差が100 $\mu m$ の場合と、公差が3 $\mu m$ の場合ではその製造の難易度が全然違う。

【0025】最適解があってそれぞれのパラメータの公差の組があり、そのうちとくに小さい公差があったりすると、その最適解にのっとった製品は製造が困難である。このような製造の難易によって解の評価をするというような視点は従来の光学設計評価にはなかったものである。従来の評価法は実際に製造し易い解を最適解とせずに、収差の小さい性能の高い解を最適解としている。

【0026】本発明は従来の設計方法に用いる評価関数と違って、それによって製作容易かどうかをも知る事ができ、結果として実際の製作が容易なレンズ系、光学系のパラメータを求めることを可能にする設計方法を与える。

【0027】

【課題を解決するための手段】全てのパラメータに誤差の無い状態 $S_0$ のパラメータ組に対する評価関数 $E_0$ と、少なくとも一つのパラメータに誤差 $\pm \delta$ の誤差がある状態 $S_1$ 、 $S_2$ …のパラメータ組に対する評価関数 $E_1$ 、 $E_2$ …を適当な重みを掛けて加えた評価関数 $E = w_0 E_0 + w_1 E_1 + w_2 E_2 \dots = \sum w_k E_k$ を作り、

これを最小にするようなパラメータの組を求めるのが本発明の光学系設計方法である。誤差を与えるパラメータは高精度で製作するのが難しいパラメータを選ぶのが良い。さらに誤差状態に与える賦与誤差 $\pm \delta$ は、通常の製造誤差よりも大きい値にするのが良い。

【0028】製造の過程で自然に現れる製造誤差ではなくて、本発明はパラメータに積極的に想定される誤差を賦与した状態 $S_1$ 、 $S_2$ 、…を考える。この誤差は前者の製造誤差と区別する為に賦与誤差と仮に呼ぶことにする。また複数の賦与誤差を含む状態を誤差状態 $S_1$ …と呼ぶ。誤差を与えない状態 $S_0$ を無誤差状態と呼ぶ。評価関数の重み付きの和 $\sum w_k E_k$ を統合評価関数と呼ぶことにする。

【0029】図12によって本発明の概略の思想を説明する。状態 $S_0$ は賦与誤差を与えない理想的な状態である(無誤差状態)。その評価関数を $E_0$ とする。これの他にパラメータ $P_1$ に誤差 $+\delta$ を与えた状態が $S_1$ (誤差状態)である。この評価関数を $E_1$ とする。状態 $S_2$ は同じパラメータ $P_1$ に $-\delta$ の誤差を与えた状態である。この評価関数を $E_2$ とする。パラメータ $P_1$ が変数として扱われるならば、これら3つの状態においてパラメータ $P_1$ は $P_1$ 、 $P_1 \pm \delta$ となって異なるが、そのほかのパラメータは共通にして変化させる。二つ以上のパラメータについて誤差を賦与するようにしても良い。その場合は $S_3$ 、 $S_4$ …など多くの状態と評価関数 $E_3$ 、 $E_4$ 、…ができる。全ての変数の値を決めて波面収差或いは光線収差などをもとめ統合評価関数 $E = \sum w_k E_k$ の値を計算し、 $E$ が最小になるような変数の組をもとめる。これが最適化計算である。適当な変数の組を初期値としてあたえ、収差を求めて、 $E$ を計算し、変数を微小変化させて、 $E$ を最小にする変数を決める。

【0030】光学変数が求められると結果を評価する。これが性能解析と公差解析である。本発明は誤差を賦与した状態 $S_1$ 、 $S_2$ …の評価関数を加えた統合評価関数を最小にするように変数を最適化するから、賦与誤差を与えたパラメータについて公差が大きくなる。公差が大きいため製造が容易になる。生産性が上がり製造コストも低減することができる。

【0031】

【発明の実施の形態】本発明は光学パラメータのいくつかについてわざと誤差を賦与した状態を想定しその評価関数を、誤差のない評価関数に加えて統合評価関数をつくりそれを最小化する変数を求めることによって光学系を設計する。それによって公差を広げる事ができ製造容易になる。

【0032】(1) 賦与誤差を賦与するパラメータというのは例えばつぎのようなパラメータである。

- ・各面の曲率半径
- ・非球面の係数
- ・面精度(面の歪み)

- ・中心厚
- ・レンズ間隔
- ・屈折率
- ・屈折率不均一性
- ・ウェッジ
- ・ティルト
- ・ディセンタ

等である。光学要素がレンズだけでなくミラーやその他の素子を含む場合はそれらの光学パラメータも考慮に入れる。これらのパラメータから一つ或いは複数個を選択して誤差を賦与した状態を想定する。特に製作精度が厳しく要求されるパラメータを選べば良い。

【0033】(2) 賦与すべき誤差 $\pm\delta$ は、製作精度を考慮の上、適当な値が設定される。通常の製作誤差以上の値とするのが望ましい。製作誤差と言うのは製造する時に偶然に発生する実際の誤差のことであり確率変数であるがここではその平均値或いは統計的にある確率で発生し得る誤差の値(2 $\sigma$ 値など)という意味である。賦与誤差 $\delta$ が小さい状態を $S_1$ 、 $S_2$ …にするとその状態に引っ張られてその状態について評価関数が小さい変数を選んでしまうので公差はあまり広がらない。ところが賦与誤差 $\delta$ が大きすぎると、 $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ …の状態間の相違が大きくなりすぎるので統合評価関数の値が下がらない。適当な賦与誤差 $\delta$ を選ぶ必要がある。

【0034】(3) 全てのパラメータに初期値を与える。これは光学方程式を満足する値というのではなく光学式をある程度満足させる値に近いといった程度のものであってよい。初期値によってそれから到達できる最適値が左右される。初期値から評価関数が減少する方向に少しずつ変数の値を変えて評価関数を最小にする変数を求める。

【0035】最適化によって、評価関数 $E$ が十分に小さくならない場合は、未だ性能が不十分であるか、或いは製造誤差の影響が強くて公差が小さすぎるということを意味する。これは統合評価関数の内訳を見ることにより判別できる。 $w_k E_k / E$  ( $k=0, 1, 2, \dots$ ) を各状態 $S_k$ について計算すれば、各状態に関する評価関数が全体の統合評価関数に対しどの程度寄与しているか

(寄与度)を求めることができる。 $w_0 E_0$ の寄与度がまだ大きければ性能不十分である。 $w_0 E_0$ の寄与度が低ければ公差が小さいことを意味する。どの状態の寄与度が高いかによって、公差が緩くなっていないパラメータを見つけられる。このように評価関数 $E$ が小さくならない場合は初期設定が悪いわけである。初期設定を見直して新たな初期値から評価関数を下げる方向に変数を変えて評価関数の繰返し計算を再び行う。

【0036】初期値の変更によっても評価関数が十分に小さくならない場合は、賦与誤差 $\delta$ をすこし小さくして初期設定し評価関数を減らす方向に変数を変えながら最小化する。最終的に公差が緩くならない場合もあり得

る。本発明によって、どんな場合でも思いのままに公差を緩められるわけではない。(本発明によって、光学理論、すなわち自然現象としての光学現象がくつがえされるわけではない。)より性能の高いレンズ、光学系を望むならば大なり小なり公差は厳しくなる。本発明は所望の性能を満足する範囲で、できるだけ公差が緩く、製造容易な解を効率的に見つけ出す方法として有効に働く。

(4) 誤差状態 $S_k$ が多い場合( $k$ の総数 $K$ は $P_i$ の $i$ の総数 $I$ の2倍: $K=2I$ )つまり $P_i$ を多数選択した場合は、評価関数が複雑になる。最適化の計算が長くなり時間もかかる。それが困るというのであれば、公差解析の結果を見て、製作上問題となるパラメータに限定して誤差を賦与するようにする。そうすると誤差状態の数 $K$ を減らし計算時間を短縮できる。つまり製造誤差を小さくするのが難しく要求される公差以下にできないようなパラメータを選ぶということである。

【0037】これまで述べてきたものは賦与誤差ひとつについて二つの誤差状態を与えた。誤差状態 $S_k$ の数を減らし、しかも公差を広げるためには、つぎのような手段をとることもできる。一つの誤差状態に二つの異なる賦与誤差を含ませる方法である。例えばパラメータ $P_i$ とパラメータ $P_j$ を選び、誤差状態 $S_1$ は $P_i$ について $+\delta_i$ 、 $P_j$ について $+\delta_j$ とし、誤差状態 $S_2$ は $P_i$ について $-\delta_i$ 、 $P_j$ について $-\delta_j$ とすることができる。 $S_1(+\delta_i, +\delta_j)$ 、 $S_2(-\delta_i, -\delta_j)$ とするのである。こうすると賦与誤差の種類は2つあり誤差状態も二つである。つまり $(+\delta_i, -\delta_j)$ と $(-\delta_i, +\delta_j)$ の状態を省いている。こうすると誤差状態の数を半分に減らせるので計算時間を短くできる。ただし、各誤差の影響が打ち消し合うことのないように、誤差を与えるパラメータの組み合わせを選択し、賦与誤差の符号選択を行う必要がある。例えば、あるレンズの厚みと他のレンズの厚みの両者の誤差を一つの状態に賦与した場合、各誤差の影響が相殺しあって、その状態に対する評価関数があまり大きな値を持たず、最適化してもあまり公差を広げられないことがある。あるいは、曲率半径と厚み、屈折率と曲率半径などでも同様のことが起こり得る。このような場合、賦与誤差の符号(+か-)の組み合わせを変えて、各誤差の影響が相殺されず強め合うように選択することが必要である。または、曲率半径、厚み、屈折率などの軸対称な誤差と、ディセンタ、ティルト、ウェッジのような軸対称でない誤差を組み合わせてもよい。

【0038】(5) 公差解析の判定指標は、像面における各点での何らかの収差や光路差或いは性能である。  
①波面収差、②光線収差、③MTF値、④歪曲収差、⑤ $f-\theta$ 線形性、⑥焦点距離などである。⑤は $f-\theta$ レンズだけに使える特殊な性能である。波面収差(①)の場合は誤差増大による波面収差の増大が例えば $\lambda/100$ 以下( $\lambda$ は波長)であるよ



うにする。その他の②～⑥に関しても適当な限界の値を決める。その限界値を与えるパラメータの設定値（設計値）からのズレ（誤差）が公差である。

【0039】図6は従来法による評価関数最小化による設計法を示す。横軸があるパラメータに関する製造誤差であり縦軸が性能である。初期値では性能は低い。これから評価関数がより小さくなるように変数を変更して行く。初期値から上向きに○が書いてあるがこれが漸近的に改善された状態である。対象のパラメータが変数として扱われ値が変化する場合には、図4に示すように変数の基準値自体が変動して性能が上昇してゆく。図4のニからホの変化のようなものを図6の初期値から最適解ヨまでの○の推移によって表現している。最適解はE<sub>0</sub>を最小にする変数の組である。これはある初期値から始めて変数を変えた時に最高の性能を与えるものである。ところが公差が小さく、ヨタ間でのみ基準性能を与えるが、タからはずれると性能が顕著に低下してしまう。

【0040】図7は本発明の方法による統合評価関数最小化による設計方法を示す。初期値は任意に選ぶ。初期値から統合評価関数を減らすように変数を変動させてゆく。最小の値を与えるのが最適値レである。誤差状態を含む統合評価関数を扱うので、公差フが広がる。広くレフ間に製造誤差があっても満足できる性能を与えることができる。

【0041】光学系を決定するパラメータは幾つもある。そのうちP<sub>1</sub>のパラメータだけに誤差±δを与える。+δの誤差を与えた状態S<sub>1</sub>の評価関数E<sub>1</sub>が統合評価関数に含まれる。統合評価関数を最小化するときE<sub>1</sub>も当然に小さくなるべきである。E<sub>1</sub>が小さいということは誤差+δがあっても性能低下が少ないような変数の組を選んでいるということである。だからパラメータP<sub>1</sub>の公差が広がる。直観的にはそういうことである。しかしこれは厳密な証明はできない。パラメータは様々であって光学方程式への関与の程度も多様であるからである。それ以外のパラメータについては公差が広がるか狭くなるかは予め分からない。それは実際に計算してみないと分からない事である。それ以外のパラメータの公差は大きくなるものもあれば小さくなるものもあり、あまり変わらないものもある。大きくなる、あるいはあまり変わらない他のパラメータは全く問題ない。また、元々大きな公差であった他のパラメータが多少小さくなくても製造上の問題は生じない。問題となるのは、

他のパラメータの公差が小さくなり、製造精度がその公差を満足できなくなる場合であるが、仮に、他のパラメータの公差が厳しくなった場合には、そのパラメータにも誤差を賦与した状態を追加して新たに統合評価関数を作成し、再び最適化を行う事によって解決できる。

【0042】

【実施例】対象になる光学系はどのようなものであっても良い。ここでは例としてf-θレンズについて、様々なパラメータについてプラスマイナスの偏奇を与えて、評価関数を最小にするような最適解を求め、公差が大きくなることを示す。

【0043】(A) 初期レンズ設定

○レンズ枚数 2枚 材質 ZnSe (屈折率 n = 2.403)

第1レンズ 第1面は非球面、第2面は球面

第2レンズ 第1面は球面、第2面は非球面

○波長 10.6 μm

○入射瞳位置 第1レンズ第1面より物界側50mm

○Fナンバー 6

○入射角 0°、8°、16°

f-θレンズというのは光軸からθをなす角度で入射した光線を像面の中心からf/θだけ離れた位置に結像するようなレンズである。図18に光学系を示す。レンズは2枚使われている。平行光をあるθの傾き角でレンズ1にいれると、レンズ2から出た光線は像面で中心からf/θ離れた点に収束する。例えばθ=0°の平行光ケ、フ、コは光軸上のJ点に収束する。θ=8°の平行光テ、ア、サは像面で8×Lの位置K点に結像する。θ=16°の平行光メ、ミ、シは像面で16×Lの位置M点に結像する。ここでLは定数である。それぞれ3本の光線しか書いていないが実際には無数の平行光線が一点に収束している。

【0044】(B) 変数設定

各面（4面ある）の曲率半径、厚み（間隔）、非球面係数、像面位置である。レンズが二つとするので、4つの曲率半径が変数として存在する。厚みについては二つのレンズの厚みと、レンズ間の距離がある。第1レンズの第1面と第2レンズの第2面は非球面としているからそれぞれについて非球面係数が変数となる。これは

【0045】

【数1】

$$Z = \frac{c r^2}{1 + \{1 - (1+k) c^2 r^2\}^{1/2}} + \sum \alpha_j r^{2j} \quad (1)$$

【0046】というように円錐定数（conic constant）kと半径rの偶数次のべきの係数α<sub>j</sub>である。cは頂点曲率（Vertex curvature）である。例えばrの4次、6次、8次、10次というようにとるとαは4つのパラメータとなる。像面位置は第2レンズからの像面の距離である。このように変数の数が多いので評価関数によって

変数の適否を判断する必要がある。

【0047】(C) 拘束条件

焦点距離 127mm、

レンズ厚み 3.5mm以上15mm以下

【0048】(D) 誤差の設定

1. ディセンタ……レンズ中心軸の光学軸からのずれ

2. ティルト……レンズの傾き
3. 各面の曲率半径…前面後面の球面の曲率半径
4. 非球面係数…ふたつの非球面の係数
5. 面精度 (面の歪み)
6. 屈折率…Z n S e レンズの全体的な屈折率の所定値からのずれ
7. 屈折率不均一性…局所的な屈折率の変動
8. ウェッジ

【0049】などである。誤差を賦与すべきパラメータは、これから一つあるいは複数個選択される。例えばもしもディセンタだけに賦与誤差を与えるとするとつぎのようになる。つまりレンズズレの無い場合 ( $S_0$ ) の評価関数  $E_0$  と、 $\pm \delta$  のレンズの軸ズレの有る場合 ( $S_1$ ) ( $S_2$ ) を仮定してそれぞれの評価関数  $E_1$ 、 $E_2$  を変数の組毎に計算し評価関数の和を最小にする最適の変数群を求める。全体の評価関数  $E$  は重み  $w_0$ 、 $w_1$ 、 $w_2$  を掛けてこれの合計とする。

$$E = w_0 E_0 + w_1 E_1 + w_2 E_2 \quad (2)$$

である。重み  $w_0$ 、 $w_1$ 、 $w_2$  は自由に決めて良い。

【0050】ここでは  $w_0 = w_1 = w_2 = 1$  としている。だから、評価関数は単に

$$E = E_0 + E_1 + E_2 \quad (3)$$

である。賦与すべきディセンタ誤差  $\pm \delta$  は製作精度のレベルを考慮して適当な値を与える。賦与誤差は製造誤差よりも大きい値とする方が良い。

【0051】ディセンタ誤差の他にその他のパラメータに誤差を与えるようにしても良い。例えば1枚目レンズの第1面の曲率半径に  $\pm 1\%$  の誤差を与える。そうすると、 $S_3$ 、 $S_4$  という状態が増える。5つの評価関数の和ができるのでこれを最小にするような変数の組を求める。そのようにして最適変数の組が求められたとき、ディセンタ公差、曲率半径公差を求めると、 $S_0$  の時の公差よりも増えている。公差が大きいため製造が容易になる。

【0052】評価関数として、例えば光線収差を採用する。もちろん、波面収差など他の光学的誤差を評価関数に用いても良い。レンズに収差があると、理想的には像面上で1点に収斂される筈の光線群が、点々と散らばつ

$$E = \sum w_k E_k = \sum \sum w_k w_f w_j (\Delta x_{kfj}^2 + \Delta y_{kfj}^2) \quad (5)$$

となる。これを最小化させるように変数を変動させるのである。

【0055】上記の評価関数では、レンズによる光の収斂特性については評価可能である。しかし  $f-\theta$  レンズの設計では、もう一つの重要な特性として  $f-\theta$  関係の直線性についても評価可能とする必要がある。(4) は像面での光線位置ズレを誤差としているから  $f-\theta$  直線性評価はこれには含まれない。 $f-\theta$  レンズの場合はさらに評価関数を工夫して良好な  $f-\theta$  の間の直線性を得るように最適化を図る必要がある。

【0056】例えば、0度、8度、16度の3つの入射

で像面に到達する。各光線のズレの二乗和をとり、それを評価関数としている。

【0053】図19は入射瞳 (entrance pupil) 上の光線の分布を示す例である。ここでは、入射瞳は、レンズに入射する光の断面と考えて良い。入射瞳の中の一点は、一本の光線を意味する。任意の瞳上の位置 ( $P_x$ 、 $P_y$ ) に好みの数の光線を取って良いが、計算の精度を上げるためには、光線の数多くて、瞳全体に広く分布させる方がよい。ここで ( $P_x$ 、 $P_y$ ) は瞳上の座標を示す。瞳の大きさは正規化してあり、半径1の円で表している。しかしながら、計算量を減らし最適化を迅速に実施するには、光線数があまり多すぎではない。図19に示すものは、18本の光線を取る例である。瞳の中心から放射状に伸びる6本の直線を取り (それぞれ0度、60度、120度、180度、240度、300度の方向)、さらに大きさの異なる3つの輪を取る。3つの輪の半径  $R$  はそれぞれ  $R = 0.3357$ 、 $0.7071$ 、 $0.9420$  である。これら6本の放射線と3つの輪の交点に計18本の光線を取る。各光線の重みは、黒丸が  $w_j = 0.048481$  (12本)、白黒丸が  $w_j = 0.07757$  (6本) とする。

【0054】各光線が像面でどのような位置にばらついて到達するかを計算すると、その位置ズレ  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  が求まる。 $\Delta x$ 、 $\Delta y$  は、全光線の重心位置からのズレの  $x$  成分と  $y$  成分である。各光線を  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, 18$ )、入射角度0度、8度、16度を  $f$  ( $f = 1, 2, 3$ ) によって示し、光線毎の重み  $w_j$  と入射角度毎の重み  $w_f$  を掛けて一つの状態  $S_k$  に対する評価関数  $E_k$  を得る (ここでは単一波長の場合を扱うので省略するが、複数の波長の光を扱う場合には、各波長にも重み  $w_\lambda$  を掛けて和を取る事になる)。  $S_k$  に対する  $E_k$  は  $E_k = \sum \sum w_f w_j (\Delta x_{kfj}^2 + \Delta y_{kfj}^2)$  (4) とする。これは各状態  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、…の評価関数  $E_0$ 、 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、…を与える。本発明は無誤差状態  $S_0$  と誤差を賦与した賦与誤差状態  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  の各評価関数を加えるので、各状態  $S_k$  の重みを  $w_k$  として、統合評価関数  $E$  は、

$$E = \sum w_k E_k = \sum \sum w_k w_f w_j (\Delta x_{kfj}^2 + \Delta y_{kfj}^2) \quad (5)$$

角度を取るとき像面での各焦点  $J$ 、 $K$ 、 $M$  の位置  $h_j$  ( $=0$ )、 $h_K$ 、 $h_M$  は、その時点での光学系のパラメータについて光線追跡することによって計算によって求められる。このとき、入射角度8度に対し16度は丁度2倍の角度と成っているため、理想的な  $f-\theta$  に直線性が成り立つのであれば、 $2h_K = h_M$  となるはずである。そこで、 $f-\theta$  の直線性を評価する関数として、 $E_L = (2h_K - h_M)^2$  (6)

を取る。入射角度を3つよりも多く設定し、式(6)のような関数を多数立てて、それらの総和を取れば、 $f-\theta$  の直線性を詳細に評価することもできる。式(5)と

同時に、式(6)のような評価関数も最小化するように変数の値を最適化する。

【0057】また、焦点距離、レンズの厚み範囲などの拘束条件についても、評価関数の中に組み込んで良い。焦点距離  $f$  を目的の値、例えば 127mm とするため

$$e_2 = \alpha (t - 3.5)^2 + \beta (t - 15)^2 \quad (8)$$

を取る。但し係数  $\alpha$  は、 $t > 3.5$  mm のとき  $\alpha = 0$ 、 $t \leq 3.5$  mm の時  $\alpha = 1$  の値を取るものとする。同じく係数  $\beta$  は  $t < 15$  mm のとき  $\beta = 0$ 、 $t \geq 15$  mm のとき  $\beta = 1$  の値を取るものとする。だからこれは厚み  $t$  が 3.5mm ~ 15mm では 0 となり、この範囲をはずれると正の値になる。このように拘束条件をも評価関数によって表現できる。このような拘束条件に関する評価関数  $e_c$  ( $e_1$ ,  $e_2$ , ...) をそれぞれ適当な重み  $w_c$

$$E = w_A \Sigma w_k E_k + w_L E_L + w_C E_C \quad (10)$$

となる。重み  $w_A$ 、 $w_L$ 、 $w_C$  は、 $\Sigma w_k E_k$ 、 $E_L$ 、 $E_C$  の各評価関数をバランス良く最小化させるように働く。ここでは単純に  $w_A = w_L = w_C = 1$  として

$$E = \Sigma w_k E_k + E_L + E_C \quad (11)$$

とする。この統合評価関数を最小化するように変数を最適化する計算を行う。最適解を求めることにより、各状態での光線収差に加え、 $f - \theta$  直線性、拘束条件のそれぞれについて、最も良好となるパラメータ値の組が求められる。

【0059】まず従来の方から見て  $S_0$  の場合の最適設計をする。評価関数は  $E = E_0 + E_L + E_C$  である。図8にこれを示す。光源から出た光はポリゴンミラーやガルバノメータミラーなどの偏向装置により偏向されて、それにより決まる入射角度でレンズに入射し、レンズによって絞られて像面に収束する。ここでは3つの偏向された光を例として示すが、この数は任意である。レンズの曲率、厚みなどが変数になる。レンズが2つ以上あればレンズ間隔も変数である。レンズの形状、寸法などに一定の制限条件が課されているのでその範囲で変数を様々に変化させる。これはディセンタも曲率半径なども誤差を与えずに、従来法に従って評価関数を計算する。評価関数が最小になる変数の(最適)値を求める。これから変数の公差を求めるものである。それによるとディセンタ公差は  $\pm 4.0 \mu\text{m}$  であった。第1レンズの曲率半径公差は  $\pm 0.066\%$  である。いずれの公差も小さいものであって製造困難である。

に、

$$e_1 = (f - 127)^2 \quad (7)$$

によって表される評価関数を取ることができる。レンズの厚み  $t$  を目的の範囲、例えば 3.5mm 以上 15mm 以下とするためには、評価関数として、

を掛けて足し合わせるにより、全ての拘束条件に関する評価関数  $E_c$  にまとめ、

$$E_c = \Sigma w_c e_c \quad (9)$$

となる。

【0058】以上に示したような、3つの評価関数(5)、(6)、(9)の総和を取って統合評価関数を完成させる。適当な重み  $w_A$ 、 $w_L$ 、 $w_C$  を掛けて総和を取る。統合評価関数  $E$  は

【0060】[実施例1 ( $\pm 160 \mu\text{m}$  のディセンタ)] ディセンタ誤差の無い  $S_0$  状態の他に2つの誤差付与状態を考える。図9に説明図を示す。光学系の変数として、レンズの前面後面の曲率、レンズ厚、レンズ間隔などがある。ディセンタがない場合を左に示す。光源からの光線がレンズによって3つの位置に収束される。その評価関数を  $E_0$  とする。この場合は波面収差ではなくて光線収差を採用している。入射角度は例えば 0 度、8 度、16 度の方向である。

【0061】ディセンタ誤差  $\pm 160 \mu\text{m}$  を与えた状態を  $S_1$  ( $-160 \mu\text{m}$ )、 $S_2$  ( $+160 \mu\text{m}$ ) とする。これらについても光線収差を採用する。それぞれの状態の評価関数を  $E_0$ 、 $E_1$ 、 $E_2$  とする。それぞれの状態に対して光学変数を与える。形状、寸法などに制限条件が課されている。制限条件内で変数を変えて、統合評価関数  $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_L + E_C$  を計算し ( $w_k = 1$ ;  $k = 0, 1, 2$ ) これを最小にする変数の組を求めた。その場合のディセンタ公差は公差解析の結果  $\pm 202 \mu\text{m}$  であった。公差が約 5 倍に大きくなるので製造が容易になる。それだけでなく性能も向上する。

【0062】図20は従来法によって無誤差状態の評価関数を最小化して求めた光学パラメータによって決まる  $f - \theta$  レンズについて、特性をシミュレーションにより解析評価した結果の一例である。

【0063】

【表1】

従来例1のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm) | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率   |
|-------|-----|-----------|------------|-------|
| L1    | S1  | 表2        | 4.228      | 2.403 |
|       | S2  | -64.058   | 6.389      |       |
| L2    | S3  | -548.067  | 13.973     | 2.403 |
|       | S4  | 表2        | 162.722    |       |

【0064】

【表2】

従来例1の非球面データ

| 面番号 | 1/c<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -35.681     | -1.234 | -2.493E-6  | -2.517E-10 | 3.050E-13  | -1.154E-15 |
| S4  | -67.083     | -0.626 | 3.407E-7   | 3.776E-11  | -1.691E-14 | -3.797E-18 |

【0065】製造誤差としてディセンタ誤差 $160\mu\text{m}$ を賦与し、そのときの像面での集光スポットの強度分布を等高線で示したものである。これは図18のJ点、K点、M点、即ち入射角度が0度、8度、16度の場合について、点像強度分布関数(point spread function)を計算した結果である。図20で、集光スポットの強度は、中心が高く、外に広がるに従って低くなる、鋭い山の形を等高線で表示している。0度(J点)のスポットは殆ど真円に近い等高線になっている。それに対して、16度(M点)のスポットは、楕円形に長く歪んでいる。これは、設定したディセンタ誤差 $160\mu\text{m}$ によ

て、M点のように、入射角度が大きくなるにつれてスポットが歪んでしまい、良好な特性が得られない事を示している。

【0066】一方、図21は本発明によってディセンタ誤差 $\pm 160\mu\text{m}$ を賦与した誤差状態を設定した統合評価関数を取り、それを最小化して求めた光学パラメータによって決まる $f-\theta$ レンズについて、上記と同じようにディセンタ誤差 $160\mu\text{m}$ を設定し特性をシミュレーションした結果である。

【0067】

【表3】

実施例1のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表4           | 4.755         | 2.403 |
|       | S2  | -73.008      | 7.211         |       |
| L2    | S3  | -282.315     | 12.951        | 2.403 |
|       | S4  | 表4           | 163.241       |       |

【0068】

【表4】

実施例1の非球面データ

| 面番号 | 1/c<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -39.877     | -2.308 | -4.698E-6  | 3.492E-10  | -3.413E-13 | -7.573E-16 |
| S4  | -63.627     | -0.242 | 1.239E-7   | 4.338E-11  | 2.666E-15  | -4.085E-18 |

【0069】このレンズではディセンタの公差が $\pm 2$ 、【0070】【実施例2】 $\pm 160\mu\text{m}$ のディセンタ誤差と $\pm 1\%$ の曲率半径誤差；その1)】ディセンタ誤差 $\pm 160\mu\text{m}$ に加えて、第1レンズの第1面の曲率半径に $\pm 1\%$ の誤差を賦与した。

【0071】

【表5】

実施例2のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表6           | 4.788         | 2.403 |
|       | S2  | -77.323      | 6.746         |       |
| L2    | S3  | -287.042     | 12.981        | 2.403 |
|       | S4  | 表6           | 163.686       |       |

【0072】

【表6】

実施例2の非球面データ

| 面番号 | 1/c<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -40.189     | 0.013  | -2.338E-7  | -3.330E-11 | 3.449E-13  | -7.662E-16 |
| S4  | -62.100     | -0.756 | -1.574E-7  | 1.876E-11  | -7.220E-16 | -5.573E-18 |

【0073】 $S_1$  ( $-160\mu\text{m}$ )、 $S_2$  ( $+160\mu\text{m}$ )、 $S_3$  ( $-1\%$ )、 $S_4$  ( $+1\%$ )と $S_0$ を加えた5つの状態について評価関数 $E=E_0+E_1+E_2+E_3+E_4+E_L+E_C$ を計算しこれを最小にする変数の組を求めた。この場合の第1レンズの第1面の曲率半径公差は $\pm 0.770\%$ となった。 $S_0$ の状態のみ扱う従来設計の公差の10倍以上に増えているからより製造容易になる。また、ディセンタの公差も $\pm 180\mu\text{m}$ とな

り、従来設計の $\pm 40\mu\text{m}$ よりも大きく緩和された。

【0074】[実施例3 ( $\pm 160\mu\text{m}$ のディセンタ誤差と $\pm 1\%$ の曲率半径誤差; その2)] ディセンタ誤差 $\pm 160\mu\text{m}$ と同時に第1レンズの第1面の曲率半径に $\pm 1\%$ の誤差を与えた。

【0075】

【表7】

実施例3のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表8           | 5.117         | 2.403 |
|       | S2  | -73.884      | 8.788         |       |
| L2    | S3  | -282.989     | 12.898        | 2.403 |
|       | S4  | 表8           | 163.186       |       |

【0076】

【表8】

実施例3の非球面データ

| 面番号 | 1/c<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -42.181     | -0.004 | -1.784E-7  | -5.900E-10 | 1.521E-12  | -1.947E-15 |
| S4  | -67.600     | -0.598 | -5.942E-8  | -2.302E-11 | 3.611E-14  | -1.850E-17 |

【0077】 $S_1$  ( $-160\mu\text{m}$ )、 $S_2$  ( $+160\mu\text{m}$ )、 $S_3$  ( $-1\%$ )と $S_0$ を加えた3つの状態について評価関数 $E=E_0+E_1+E_2+E_L+E_C$ を計算しこれを最小にする変数の組を求めた。この場合、ディセンタ公差は $\pm 201\mu\text{m}$ に、第1レンズの第1面の曲率半径公差は $\pm 0.645\%$ となった。 $S_0$ の状態のディセンタ公差の約5倍の公差になり、曲率半径については約10倍に増えているからより製造容易になる。

【0078】[実施例4 ( $\pm 0.2\text{mm}$ のレンズ厚み、レンズ間隔誤差)] これまでに述べたものはディセンタ誤差とレンズの曲率半径の誤差に関するものであった。次にレンズ厚みとレンズ間隔に誤差を与えて評価関数を作ってこれを最小化した。

【0079】

【表9】

実施例4のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表10          | 4.331         | 2.403 |
|       | S2  | -83.277      | 4.888         |       |
| L2    | S3  | -313.919     | 13.173        | 2.403 |
|       | S4  | 表10          | 164.591       |       |

【0080】

【表10】

実施例4の非球面データ

| 面番号 | 1/c<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -37.641     | -0.075 | -5.120E-7  | 4.102E-10  | -1.307E-13 | -5.388E-16 |
| S4  | -56.159     | -0.489 | -4.947E-9  | 1.217E-10  | -2.974E-14 | 1.304E-18  |

【0081】 誤差を与えた状態は6つある。第1レンズの厚み、間隔の公差が±0.23mmに増大した。公差の厚みについて±0.2mmの誤差を付与した状態がS<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、レンズ間隔に±0.2mmの誤差を与えた状態がS<sub>3</sub>、S<sub>4</sub>である。第2レンズ厚みに±0.2mmの誤差を与えた状態がS<sub>5</sub>、S<sub>6</sub>である。そして、統合評価関数 $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_L + E_C$ を最小にするような変数の組を求めた。E<sub>0</sub>を最小にするだけの変数の組の場合は、レンズ厚み、間隔の公差が±0.08mmであったが、6つの誤差を含む状態の統合評価関数を最小にする変数の組で

が約3倍になっているのでより製造容易な訳である。

【0082】 [実施例5 (±0.02の屈折率誤差)] 第1レンズ、第2レンズともにZnSeの赤外光用の材料を使う。屈折率は2.403とするのが通常であるが、これに対して±0.02の屈折率誤差を付与した状態を考える。

【0083】

【表11】

実施例5のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表12          | 4.511         | 2.403 |
|       | S2  | -61.950      | 7.773         |       |
| L2    | S3  | -458.311     | 13.771        | 2.403 |
|       | S4  | 表12          | 161.354       |       |

【0084】

【表12】

実施例5の非球面データ

| 面番号 | 1/c<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -37.381     | -0.080 | 4.417E-7   | 3.431E-10  | 8.272E-15  | 7.625E-17  |
| S4  | -71.895     | -1.055 | 8.115E-8   | 3.923E-12  | -7.892E-15 | 3.582E-19  |

【0085】 S<sub>0</sub>は屈折率誤差のない状態である。S<sub>1</sub>は第1レンズの屈折率に+0.02の誤差がある状態、S<sub>2</sub>は第1レンズの屈折率に-0.02の誤差がある状態、S<sub>3</sub>は第2レンズの屈折率に+0.02の誤差を与えた状態、S<sub>4</sub>は第2レンズの屈折率に-0.02の誤差を与えた状態である。これらの5つの状態の評価関数をE<sub>j</sub> (j=0, ..., 4)とする。統合評価関数 $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_L + E_C$ を最小にする光学変数を求めた。誤差を与えないS<sub>0</sub>を最小として求めた変数に対して屈折率公差は±0.00782であるが、統合評価関数を最小にする変数に対する屈折率公差は±0.0115であった。約5割増加している。

【0086】 [実施例6 (±0.2mmのレンズ厚み間隔誤差と±10分のティルト誤差)] 実施例4のレンズ厚み、間隔に加えて、レンズのティルト誤差として±10分を賦与したもの考える。実施例4ではレンズ厚み、間隔の公差が緩くなったが、逆にティルトの公差は従来法の±10.7分に対し、実施例4で±3.8分に厳しくなった。そこで、本実施例では、レンズ厚み、間隔に加えティルトの誤差も賦与して、それらすべての公差が増大することを示す。

【0087】

【表13】

実施例6のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm) | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率   |
|-------|-----|-----------|------------|-------|
| L1    | S1  | 表14       | 4.459      | 2.403 |
|       | S2  | -71.751   | 6.249      |       |
| L2    | S3  | -314.932  | 13.189     | 2.403 |
|       | S4  | 表14       | 163.439    |       |

【0088】

【表14】

実施例6の非球面データ

| 面番号 | 1/c (mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -37.873  | 0.084  | 2.449E-7   | 2.461E-10  | 7.303E-13  | -8.252E-16 |
| S4  | -61.758  | -0.514 | 8.815E-8   | 4.215E-11  | 2.604E-15  | -8.652E-18 |

【0089】 $S_1 \sim S_6$ は実施例4と同じである。 $S_1, S_2$ は第1レンズの厚みについて $\pm 0.2$ mmの誤差を付与した状態、 $S_3, S_4$ はレンズ間隔に $\pm 0.2$ mmの誤差を与えた状態である。 $S_5, S_6$ は第2レンズ厚みに $\pm 0.2$ mmの誤差を与えた状態である。 $S_7$ は第1レンズに $\pm 10$ 分のティルト誤差を賦与したものである。 $S_8$ は第1レンズに $-10$ 分のティルト誤差を賦与した状態である。 $S_9$ は第2レンズに $\pm 10$ 分のティルト誤差を与えた状態、 $S_{10}$ は第2レンズに $-10$ 分のティルト誤差を与えたものである。それらの評価関数として、 $E_1 \sim E_{10}$ に対応させ、統合評価関数 $E = E_0$ を考慮する。ティルト誤差を賦与していない評価関数 $E = E_0 + E_1 + \dots + E_6 + E_L + E_C$ の実施例4の場合ティルト公差は $\pm 3.8$ 分であった。ここでティルト誤差 $\pm 10$ 分を加えると、ティルト公差が $\pm 8.1$ 分に増加した。約2倍に増えているので製造容易である。レンズ厚み、レンズ間隔の公差は $\pm 0.25$ mmになった。

【0090】【実施例7（ $\pm 5$ 分のウェッジ誤差）】第2レンズのウェッジ誤差として $\pm 5$ 分を設定した。

【0091】

【表15】

実施例7のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm) | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率   |
|-------|-----|-----------|------------|-------|
| L1    | S1  | 表16       | 3.500      | 2.403 |
|       | S2  | -49.165   | 8.444      |       |
| L2    | S3  | 無限大       | 9.978      | 2.403 |
|       | S4  | 表16       | 157.701    |       |

【0092】

【表16】

実施例7の非球面データ

| 面番号 | 1/c (mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -31.575  | -0.257 | 1.359E-6   | 7.887E-10  | -2.193E-13 | 3.206E-16  |
| S4  | -79.449  | -1.711 | 8.460E-7   | -1.534E-10 | 1.126E-14  | 3.109E-19  |

【0093】 $S_1$ は $\pm 5$ 分のウェッジ誤差を賦与した状態である。 $S_2$ は $-5$ 分のウェッジ誤差を賦与した状態である。従来法 $E_0$ だけの評価ではウェッジ誤差は $\pm 1.9$ 分であった。 $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_L + E_C$ を最小にすることによってウェッジ公差が $\pm 2.7$ 分に改善された。 $0.8$ 分拡大するので製造容易になる。

レンズは一定の屈折率を持つと仮定して計算してきた。屈折率全体の揺らぎについては実施例5で $\pm 0.02$ の誤差を賦与したものを説明した。ここでは一様な屈折率の揺らぎではなくて空間的な不均一性を扱う。

【0095】

【表17】

【0094】【実施例8（屈折率分布の不均一性）】レ

実施例8のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm) | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率   |
|-------|-----|-----------|------------|-------|
| L1    | S1  | 表18       | 3.500      | 2.403 |
|       | S2  | -51.409   | 6.817      |       |
| L2    | S3  | 無限大       | 10.251     | 2.403 |
|       | S4  | 表18       | 157.629    |       |

【0096】

【表18】

実施例8の非球面データ

| 面番号 | 1/c (mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -31.225  | -0.217 | 1.870E-6   | 1.242E-9   | -1.490E-13 | 3.946E-16  |
| S4  | -73.378  | -2.088 | 6.560E-7   | -1.582E-10 | 2.090E-15  | 1.925E-18  |

【0097】第2レンズについての式で表現されるような半径に依存する屈折率不均一があるとする。

$$n = n_0 + A r^2 + B r^4 \quad (r = (x^2 + y^2)^{1/2}) \quad (12)$$

 $n_0 = 2.403$ 

$S_0$  は  $A=0$ 、 $B=0$  の屈折率均一状態である ( $n=n_0$ )。  $S_1$  は  $A=+5 \times 10^{-7}$ 、 $B=-4 \times 10^{-10}$  の屈折率不均一の状態である。  $S_2$  は  $A=-5 \times 10^{-7}$ 、 $B=+4 \times 10^{-10}$  の屈折率不均一の状態である。  $S_0$  だけの評価関数  $E_0$  を最小化したものでは屈折率不均一 (inhomogeneity) の公差が  $\pm 0.0000193$  であった。本発明に従って、統合評価関数  $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_L + E_C$  を最小化して変数を最適化したものは、屈折率不均一性公差は  $\pm 0.0000267$  に改善された。約4割公差が増大した事になる。

【0099】【実施例9 (非球面レンズ)】次に単純な非球面レンズの集光レンズを例に、実施例1~8とは異なるパラメータに誤差を賦与して評価関数を設定し、それを最小化するような変数を求める事で、 $f-\theta$  レンズの場合同様公差が大きくなる事を示す。

【0100】(A) 初期レンズ設定。

レンズ枚数1枚 材質 ZnSe (屈折率  $n=2.403$ )

第1面は凸面の非球面、第2面は凹面の球面。

波長 10.6  $\mu\text{m}$

入射瞳径  $\phi 50.8 \text{ mm}$

入射角度 0度 (垂直入射のみ)

レンズは、ZnSe製でメニスカス形状を有し、第1面が非球面である。入射光は波長10.6  $\mu\text{m}$  の赤外光で平行光が垂直入射するのみである。

【0101】(B) 変数設定

第1、第2面の曲率半径、非球面係数 ( $k$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ )、厚み、像面位置を変数とする。

【0102】(C) 拘束条件

焦点距離 95.25 mm

レンズ厚み 3 mm以上12 mm以下

面精度の誤差 (Fringes Irregularity) を問題にする。

これは理想曲面からのズレである。波長0.633  $\mu\text{m}$  のHe-Neレーザを基準波長として適当な干渉計を用いて測定することができる。ズレの大きさを干渉縞の本数で表す。例えば図15に示すようにx軸方向とy軸方向の断面それぞれで曲率のズレがある場合を考える。ここでレンズの軸をz軸とし、z軸に垂直な面内にX軸、Y軸をとる。すなわち回転対称でないシリンダカルな歪が生じている。このとき、干渉縞は図16のようになる。縦方向と横方向の縞の本数の差を取って面の歪を表す。

【0103】

【表19】

従来例2のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm) | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率   |
|-------|-----|-----------|------------|-------|
| L1    | S1  | 表20       | 5.518      | 2.403 |
|       | S2  | 184.565   | 91.359     |       |

【0104】

【表20】



従来例2の非球面データ

| 面番号 | l/c<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | 78.854      | -0.637 | 9.892E-8   | 2.658E-11  | -5.060E-14 | 4.251E-17  |

【0105】面精度誤差を含まない状態 $S_0$ のみを含めた評価関数 $E = E_0 + E_c$ を最小にする変数の組（従来例2）では、面精度公差は $\pm 2.97$ 本であった。

【0106】本発明の思想に従って、 $\pm 5$ 本の縞本数が現れるようなシリンジカルな面精度誤差のある状態 $S$

$_1$ 、 $S_2$ を仮定し、これらの評価関数 $E_1$ 、 $E_2$ を加えた統合評価関数 $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_c$ を最小にする変数を求めた（実施例9）。

【0107】

【表21】

実施例9のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表22          | 5.519         | 2.403 |
|       | S2  | 157.562      | 91.092        |       |

【0108】

【表22】

実施例9の非球面データ

| 面番号 | l/c<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | 73.777      | -0.692 | 1.584E-7   | -9.897E-11 | 3.263E-13  | -2.681E-16 |

【0109】これによると面精度の公差は $\pm 4.67$ 本にまで改善された。

【0110】

【発明の効果】本発明は、光学パラメータのうち一つあるいは複数のパラメータ $P_1$ について $\pm \delta$ の誤差を含ませた状態 $S_1$ 、 $S_2$ …を考えこれらの評価関数 $E_1$ 、 $E_2$ 、…を無誤差状態 $S_0$ の評価関数 $E_0$ に加えた統合評価関数 $E_0 + E_1 + E_2$ …を作り、変数を変えながら、これを最小にする変数を探すようになっている。誤差を賦与した状態を考えたパラメータ $P_1$ については公差が広がる。公差が大きくなるので製造容易になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】レンズ設計法の概略説明図。

【図2】平面波がレンズによって球面波に変換された場合の波面の変化を示す図。

【図3】理想の波面からの実際の波面の食い違いが波面収差であることを説明する図。

【図4】光学系変数の関数として性能が変動するが変数の変化が僅かな場合でも性能変化が大きい時と、変数変化が大きくても性能低下が少ない時があることを説明する図。

【図5】光学系の性能が製造誤差とともに減少するが性能低下がある基準値までは許容されたとしその誤差を公差とする事を説明するグラフ。

【図6】従来法に従って、誤差を与えない評価関数 $E_0$ で光学パラメータを決定した時は公差が小さくなること

を説明する図。

【図7】本発明の思想に従っていくつかのパラメータに誤差を与えて、誤差を含む状態の評価関数を、誤差を含まない評価関数に加えた統合評価関数を最小にするようにパラメータを選んだ場合に公差が広がり、製造容易になることを説明する図。

【図8】誤差を賦与しない状態の評価関数 $E_0$ を最小にすることによって光学パラメータを求める従来法の手順を説明する図。

【図9】 $\pm \delta$ のディセンタ誤差を賦与した状態の評価関数 $E_1$ 、 $E_2$ を、誤差を与えない状態の評価関数 $E_0$ に加えた統合評価関数を作りこれを最小化することによってパラメータを決める本発明の手順を説明する図。

【図10】誤差を与えない状態の評価関数を最小化してパラメータを決定する従来の方法によると、製造誤差がわずかであっても収差の増加が著しくて公差が広く取れないということを説明するグラフ。横軸は製造誤差でありさまざまなパラメータの誤差を纏めて表現している。

【図11】誤差を与えた状態の評価関数と誤差のない状態の評価関数とを加えた統合評価関数を最小化してパラメータを決定する本発明の方法によれば、製造誤差が多少有っても収差の増加は僅かであり、公差を広くとれることを説明するグラフ。横軸は製造誤差でありさまざまなパラメータの誤差を纏めて表現している。縦軸は収差であるがこれは性能一般に拘る収差を示し光線追跡に於ける位置のズレや波面収差など適当な収差を選ぶことが

できる。

【図12】 誤差を賦与した状態についての評価関数を用いる本発明の設計方法の流れを説明する図。

【図13】 2枚のレンズの軸がずれた状態を示す図。これがディセンタ誤差である。

【図14】 (1)は2枚のレンズのうち一方のレンズ光軸が傾いた状態を示す図。ティルト誤差である。(2)はレンズの厚みが均一でなくて楔型に変化している状態を示す図。これがウェッジである。

【図15】 シリンドリカルな面の歪を示すグラフ。実線は理想のレンズ曲面を示し、破線が実際のレンズ曲面を示す。曲面であるから2次元的な広がりをもつ。ここではx-z断面と、y-z断面をしめす。y方向には理想曲面どおりであるが、x方向には理想曲面からずれているという有り様を示す。

【図16】 図15のようなx方向に曲面のずれをもつレンズのHe-Neレーザ(波長 $\lambda=0.633\mu\text{m}$ )による干渉縞を示す。

【図17】 第1面が凸面(非球面)、第2面が凹面(球面)である非球面レンズにおいて平行光が一点に収斂さ

れることを示す図。

【図18】  $f-\theta$  レンズにおいて0度、8度、16度の入射角度でレンズに入射した光が像面上にそれぞれ異なる位置へ収斂される様子を示す図。

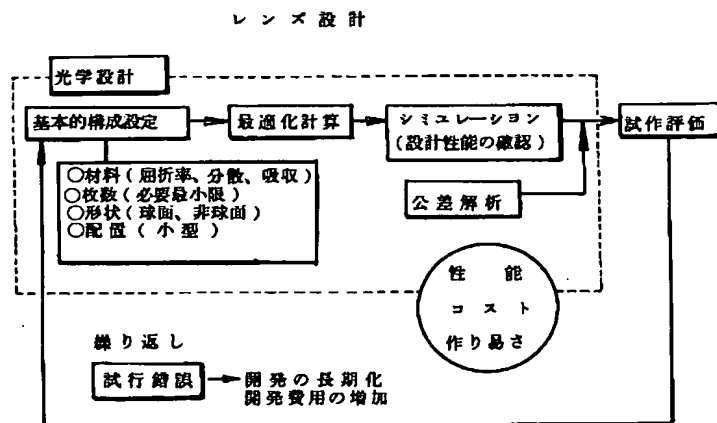
【図19】  $f-\theta$  レンズの実施例に於いて入射瞳内に18本の光線を取る例を示す図。

【図20】 従来法にしたがって誤差を与えない状態 $S_0$ の評価関数 $E_0$ を最小にすることによって求められた光学パラメータによって決定される $f-\theta$  レンズに $160\mu\text{m}$ のディセンタ誤差を与えた場合に、 $0^\circ$ 、 $8^\circ$ 、 $16^\circ$ の各入射角度について像面上での集光スポットの強度分布を等高線によって示す図。

【図21】 本発明にしたがって、ディセンタ誤差を与えた誤差状態の評価関数 $E_1$ 、 $E_2$ を、誤差を与えない状態 $S_0$ の評価関数 $E_0$ に加えた統合評価関数 $E$ を最小にすることによって求められた光学パラメータによって決定される $f-\theta$  レンズに $160\mu\text{m}$ のディセンタ誤差を加えた場合に、 $0^\circ$ 、 $8^\circ$ 、 $16^\circ$ の各入射角度について像面上での集光スポットの強度分布を等高線によって示す図。

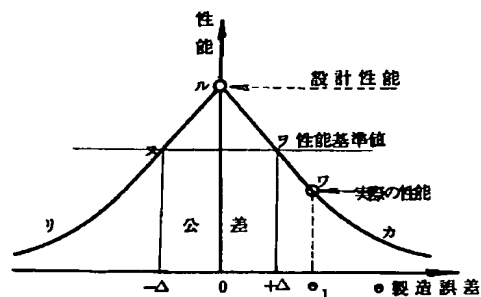
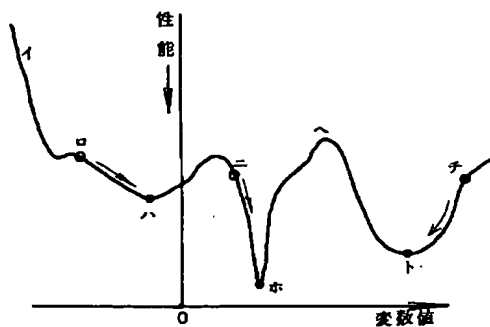
【図1】

【図2】

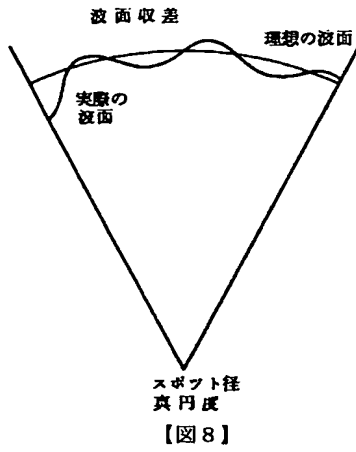


【図4】

【図5】

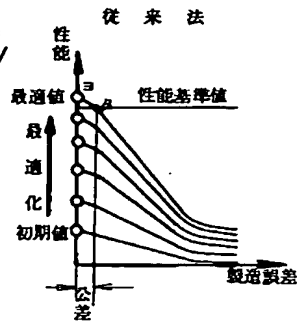


【図3】

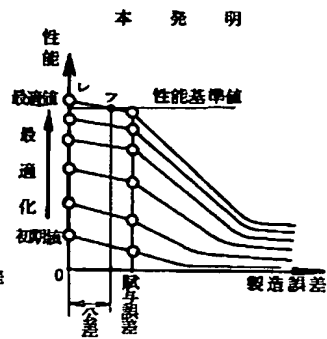


【図8】

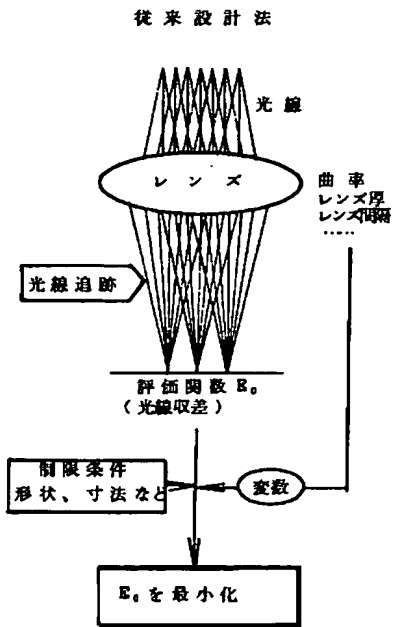
【図6】



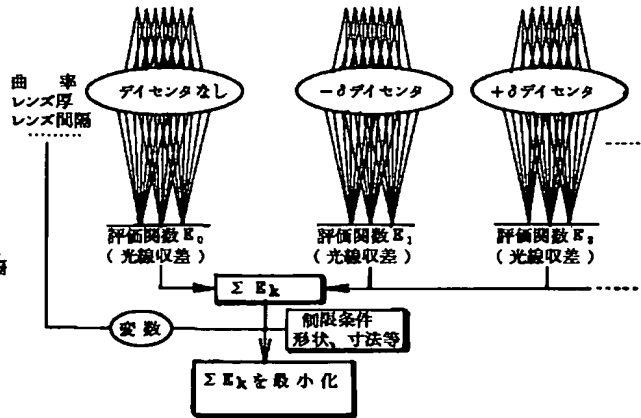
【図7】



【図9】

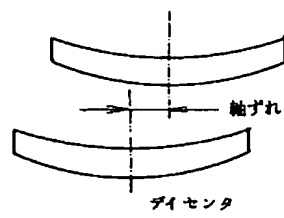
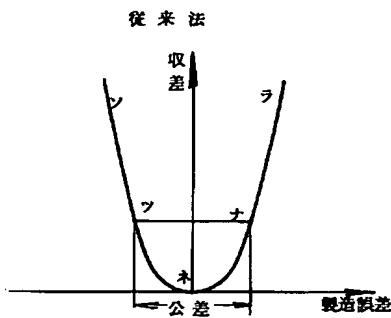


【図21】

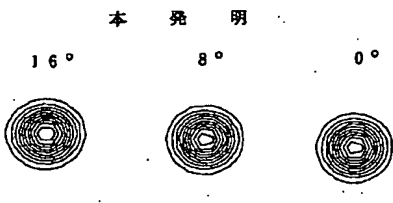


【図10】

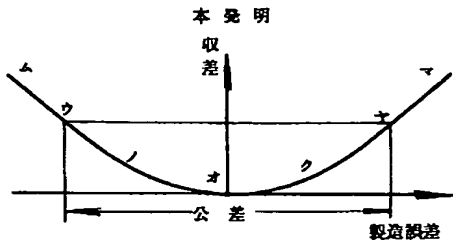
【図13】



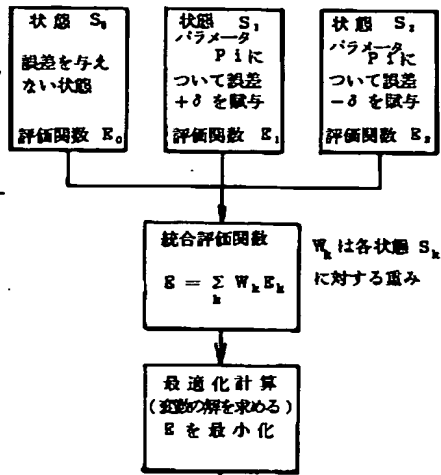
【図20】



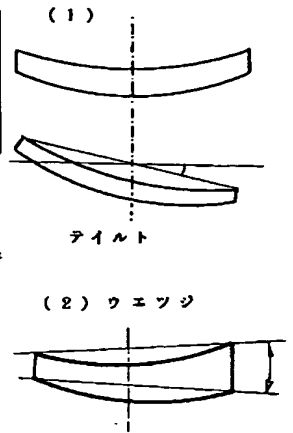
【図11】



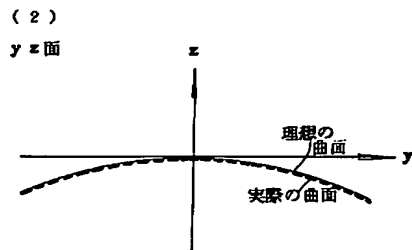
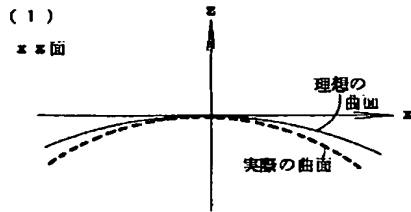
【図12】



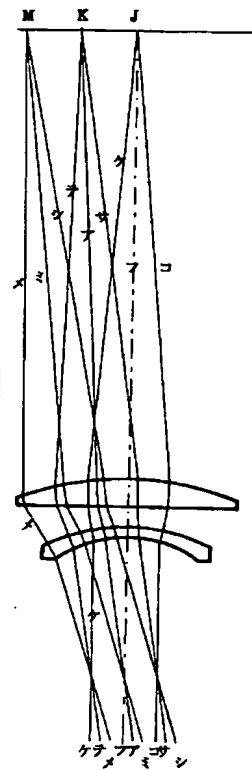
【図14】



【図15】

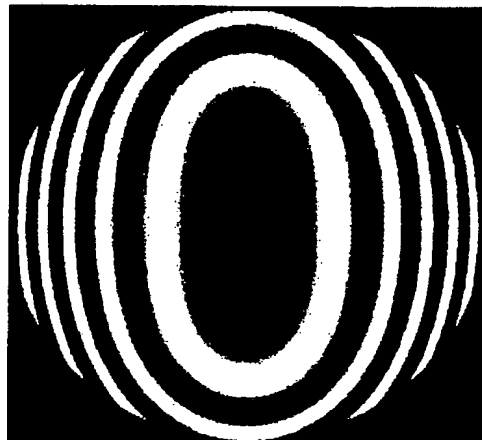


【図18】



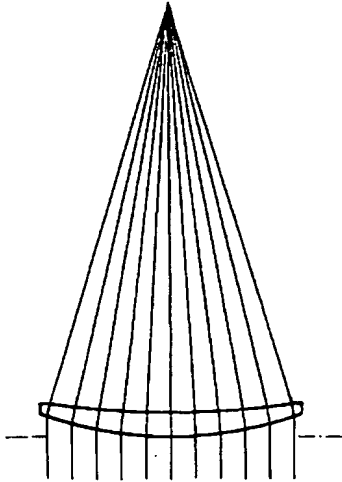
結果の評価  
(性能解析、公差解析)  
誤差のない状態  $S_0$  に加え  
誤差のある  $S_1$ 、 $S_2$  においても  
高い性能を有する  
公差が緩く製造容易

【図16】



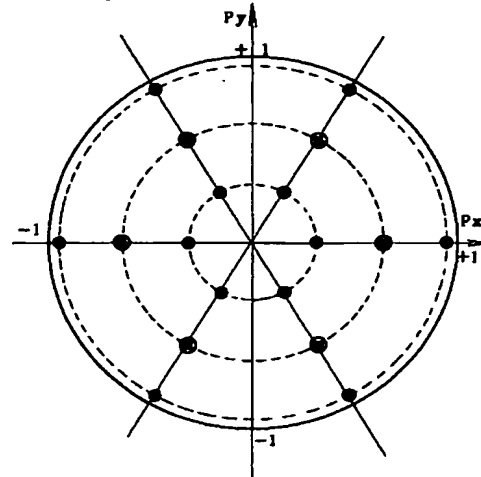
【図17】

非球面レンズ



【図19】

8 Rings  $R = 0.8857, 0.7071, 0.9420$   
 6 Arms  $\theta = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ$



●  $w = 0.048481$  12 本

⊙  $w = 0.07757$  6 本

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-316338

(43)Date of publication of application : 16.11.1999

(51)Int.Cl.

G02B 13/00  
G06F 17/50

(21)Application number : 11-044161

(71)Applicant : SUMITOMO ELECTRIC IND LTD

(22)Date of filing : 23.02.1999

(72)Inventor : FUSE TAKASHI

(30)Priority

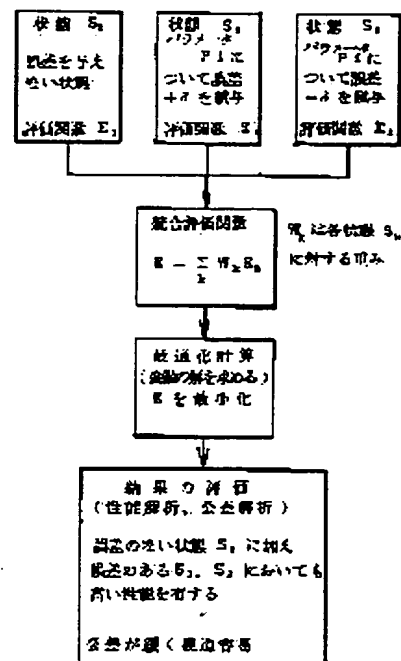
Priority number : 10 69480 Priority date : 03.03.1998 Priority country : JP

## (54) LENS AND METHOD FOR DESIGNING OPTICAL SYSTEM

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To make it possible to determine the parameters of a lens system and optical system which facilitate actual manufacture by making an overall evaluation function obtd. by adding an evaluation function in the state of containing errors to the evaluation function of an errorless state relating to the plural parameters and determining the variable to minimize the same.

SOLUTION: A state S0 is an ideal state (errorless state) in which an impartation error is not given and the evaluation function is determined as E0. The state that the error  $+\Delta$  is added to the parameter  $P_i$  in addition thereto is S1 (error state) and the evaluation function is determined as E1. A state S2 is the state added with the error of  $-\Delta$  to the same parameter  $P_i$  and the evaluation function is determined as E2. If the parameter  $P_i$  is handled as the variable, the parameter  $P_i$  in the three states is  $P_i, P_i \pm \Delta$  and varies. The other parameters are commonly changed. The values of all the variables are determined and a wave front aberration or beam aberration, etc., are determined. The value of the overall evaluation function =  $\Delta WKEK$  is calculated and the set of such variables as to minimize E is determined.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 19.05.1999

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3006611

[Date of registration] 26.11.1999

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C) 1998,2003 Japan Patent Office

## \* NOTICES \*

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.\*\*\* shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

---

CLAIMS

---

[Claim(s)]

[Claim 1] the condition S0 that it is without error about all the optical parameters that determine optical system Performance index E0 over a parameter group The condition S1 that the error of error  $\Delta$  is in at least one optical parameter. S2 The performance index E1 over —, and E2 Performance-index  $E = w_0 E_0 + w_1 E_1 + w_2 E_2$  which applied suitable weight and added — —  $= \sum w_k E_k$  The design approach of of the lens and optical system which are characterized by asking for the group of an optical parameter which makes and makes this min.

---

[Translation done.]

## \* NOTICES \*

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

## DETAILED DESCRIPTION

## [Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] this invention — manufacture — it is related with the design approach of an easy lens or optical system. In case a lens system etc. is designed, the value of all the optical parameters that form an optical equation, solve this with a certain means, and determine a lens system is calculated. This needs to evaluate whether it is a suitable solution. A thing called a performance index is used for evaluation. This pursues a beam of light and is the sum of the square of some errors in each point, such as a position error, wave aberration, etc. in the image point. The error as the whole is so small that this is small. It comes out, and since it is, let this be a design value in quest of the parameter which makes a performance index min. Since it is the function by which the quality of a design value can be evaluated, it is called a performance index. The design value which makes a performance index min should give the most excellent engine performance.

[0002] However, there is a manufacture error in fact. As a design value, it cannot make because of an error. then, the minimum — if an error is not less than [ this ], it will decide the range of the maximum error of being bad to give the engine performance of only this. It is tolerance with error. This is tolerance (TOLERANCE). However the engine performance when the ability to manufacture as a design value may be excellent, manufacture is difficult when tolerance is small. It is important to find the group of the parameter that the design engine performance is also excellent and tolerance is large. this invention — larger manufacture of tolerance — it aims at giving the design approach of easy optical system.

[0003] The vocabulary is described. Although there are various things in the parameter which defines a lens and optical system, when designing, this invention explains that there are two side faces in the way of being treated. One side face is that there are a parameter treated as a variable on the computation of optimization when designing the lens and optical system which have a desired property, and a parameter treated as a constant. When considering the optical system constituted with two or more lenses, computation which calculates the optimal value so that parameters, such as thickness of each lens, radius of curvature of each side, and spacing between each lens, may satisfy the engine performance of the purpose is performed. The parameter of other constants which do not turn into a variable at this time maintains a fixed value with a fixed value. For example, they are treated as a constant the case of the distance from the light source to a lens, the thickness and the curvature ( $= 0$ ) of a window or the configuration of some lenses, and the distance between lenses being fixed to a default. Since the number of sheets of physical-properties values decided by the quality of the material of a lens, such as a refractive index and distribution, or a lens cannot usually change a value as a variable during count of optimization, it is not a variable but a constant (treated as a prerequisite of computation.). It is possible to change the quality of the material and number of sheets as modification of a prerequisite.

[0004] Another side face is the parameter which gives an endowment error, and a parameter which is not so, as stated later. The word endowment "error" is the fundamental thought of this invention, and describes the semantics later. It is not a well-known concept. It is a completely new concept. However, since it is convenient behind after if you describe the class of parameter here, the partition of the parameter by the endowment error is also explained beforehand. When all parameters manufacture it after a design, they will surely have a manufacture error to some extent. Even if an optimum value is calculated as mentioned above, when the parameter used as variables, such as thickness of a lens, radius of curvature, and lens spacing, is actually manufactured, it will have a thickness error, a radius-of-curvature error, and a lens spacing error. On the other hand, the parameter treated as a constant has an error similarly. The heterogeneity of the wedge (\*\*\*\*) of a lens, DISENTA (axial gap, eccentricity), a tilt (inclination), profile irregularity (distortion of a field), and a refractive index etc. is a parameter with which a manufacture error is expressed purely, and, generally a design top is a parameter with which it will be the requisite that it is completely zero. In this invention, the parameter with which a manufacture error influences optical-character ability greatly is selected from all these parameters, an endowment error is positively given to the parameter, and optimization processing is performed. The parameter which gives an endowment error may be a parameter treated as a design top variable, or may not be so. Moreover, you may be parameters with which an error is expressed from the first, such as a wedge and DISENTA. The parameter which was able to give the endowment error will usually have three values. If endowment error  $\Delta$  was given to the value  $P$  of a certain parameter, the parameter has three values of maximum  $P+\Delta$  and minimum value  $P-\Delta$  with central value  $P$ . Even if this parameter is a constant and it is a variable, there is no difference in how to give an endowment error. If the value of a variable changes during optimization count, an endowment error will be given on the basis of the new value. For example, the thickness of a certain lens is a variable, and if the value of the thickness was 10mm in the middle of optimization computation when giving it a  $\pm 0.5$ mm endowment error, the thickness is treated noting that it has three values, the central value of 10mm, maximum  $10\text{mm}+0.5\text{mm}=10.5\text{mm}$ , and minimum value  $10\text{mm}-0.5\text{mm}=9.5\text{mm}$ . Even if computation progresses and the value of thickness changes to 11mm, the  $\pm 0.5$ mm same endowment error is given, and it is treated noting that it has three values, 11mm, 11.5mm, and 10.5mm, at the time. In the sense of more than, a parameter can be classified into four according to this invention.

1. Parameter which is variable and gives endowment error.
2. Parameter which is constant and gives endowment error.
3. Parameter which is variable and does not give endowment error.
4. Parameter which is constant and does not give endowment error.

[0005]

[Description of the Prior Art] Drawing. 1 explains the outline of the design approach of optical system. In order to design the



optical system which consists of a lens system, initial value must be determined about parameters, such as configuration selection of the ingredient (a refractive index, distribution, absorption coefficient) of a lens, the number of sheets of a lens, the spherical surface, the aspheric surface, etc., and relative arrangement (distance between lenses, lens image surface distance) of a lens. It determines whether to calculate a solution by making what into a variable in those parameters again. This is a setup of a basic configuration. In addition, there are some constraints, such as a dimension of the wavelength of the light source, the thickness of a lens, an ingredient, and the whole. Conditions which stand the formula which gives the refraction in respect of a lens in consideration of these constraints, and give a desired output are imposed, and the solution of variables, such as thickness of a lens, curvature, an aspheric surface multiplier, and spacing, is calculated by count. That is, the value of the variable which solved the equation is a solution and the set of a solution can define optical system.

[0006] However, the equation which gives many case predetermined purposes can be abstract, and a solution cannot be given uniquely. Even if there is a constraint, the number of formulas is insufficient, and there are many solutions. Moreover, the equation itself is nonlinear, and since there are also many variables which determine the lens itself when using an aspheric lens, most cannot solve these equations analytically. In that case, various approximate expressions are used, or beam-of-light analysis is made, and a solution is calculated about the variable of optical system. Many approximate solutions are also possible. There is a solution with which are satisfied of the formula which gives the desired refraction and the reflection by the lens and the mirror often innumerable, and a suitable parameter is hardly given [ of one solution ] immediately. Although many solutions can be found, it is necessary to find the group of the future most suitable solution.

[0007] A thing called a performance index is considered as a function for judging whether a solution is suitable. Generally this adds a square with error. Since the one where an error is smaller is generally highly efficient, this can estimate the engine performance of a product. It can also ask for a variable according to the conditions of furthermore making a performance index into min. By this invention, a performance index attaches suitable weight and it adds the square of the optical error (aberration) in some points of the image surface. Of course, there are many classes of aberration. Among those, the optical error (aberration) of a suitable class is adopted and a performance index is defined. The optical-system performance index containing a lens adopts wave aberration as an error of a performance index. Or gap (beam-of-light aberration) of the beam of light in the testing point of the image surface may be used as an error. The error of a performance index adopts a suitable thing at any time.

[0008] Drawing 2 shows drawing which a plane wave converges with a lens and carries out image formation to one point. Although a wave front is a flat surface in a plane wave, if extracted with a lens, a wave front will turn into the spherical surface. However, it may not become a strict spherical wave in fact. It is shown in drawing 3. An ideal wave front and an actual wave front cross. This difference is wave aberration. An image shifts from a perfect circle at an image formation point for wave aberration. Moreover, it separates from the case where the diameter of a spot is ideal. The inconsistency of roundness is also a kind with error. The difference in the diameter of a spot is also an error. Therefore, these errors are also employable as an error of a performance index.

[0009] The aberration generated by the solution which asked for the point is searched for, a performance index is made and the value of a performance index is calculated. The value is evaluating the validity of a solution. The value of a performance index is calculated from some solutions. Among those, let the group of the solution which makes a performance index min be an optimum design value. This is called optimization count. for example, aberration coefficient  $s_j$  \*\* — what is said — assuming — the desired value —  $s_{j0}$  and weight —  $w_j$  \*\* — carrying out — a performance index  $\phi$  —  $\phi = \sum w_j (s_j - s_{j0})^2$  \*\* — it may carry out A performance index is defined as a square error of aberration, and this is minimized. Thus, it is an original performance index to put into a performance index in quest of a solution from an optical equation, and to evaluate a solution.

[0010] However, a solution may be calculated by the performance index from the start, without calculating a solution from an optical equation. Initial value with optical-system variables (a refractive index, thickness, curvature, aspheric surface multiplier, etc.) is given, the performance index of this is searched for, a slight change is given to a variable from initial value, the performance index of that is searched for, and there is also an asymptotic method of giving change of a variable in the direction in which a performance index decreases, and going to it. If the concrete value of an optical variable is assumed, ray tracing can be carried out and beam-of-light aberration and wave aberration will become computable. The performance index which calculates wave aberration, beam-of-light aberration, etc., and is made to constitute from the result from errors, such as wave aberration and beam-of-light aberration, is calculated to initial value. since it does not solve, a solution is begun and it assumes, ray tracing is possible. And slight \*\*\*\* is given to initial value, ray tracing is carried out similarly, and a performance index is calculated in quest of wave aberration, beam-of-light aberration, etc. Thus, a solution is assumed one after another and a performance index estimates the quality.

[0011] In this way, it asks for the group of the variable which makes a performance index min. This is optimization count. Simulation of saying [ ? ] what what next happens to the aberration of a beam of light or a wave front with this value, or happens to the configuration of a spot in each point is carried out. Since the optimal design value was decided, a parameter can be shifted from a design value and the performance degradation from an ideal condition is investigated. The maximum error of the range which can permit degradation is searched for as tolerance. This is tolerance analysis. The basic configuration setup so far, optimization count, simulation, tolerance analysis, etc. are optical designs.

[0012] Then, based on the result searched for, optical system is actually produced. And the engine performance is actually investigated. This is prototype evaluation. The viewpoint of the actual engine performance, the manufacturing cost, the ease of making, etc., etc. estimates a product. The approach by the performance index has chosen the value only on the basis of the engine performance, and neither cost nor the ease of making is taken into consideration. Therefore, prototype evaluation is indispensable.

[0013] When a satisfying thing is not obtained by prototype evaluation, it returns first and redoes from the phase of a basic configuration setup. The same thing is repeated and, finally it asks for the group of the optimal variable value (optimum solution). Since the same process to this phase is repeated, a development cycle will become long if there are many counts of a repeat. Development costs increase. It is not desirable. I want to ask for the optimal quicker variable.

[0014]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] Not only aberration but cost and manufacture nature must take evaluation of the engine performance of a lens system into consideration. \*\*\*\*\* calculated in the conventional appraisal method as it is the optimal — not necessarily — manufacture — it is not necessarily easy. The variable of the called-for lens should give the thing of the optimal engine performance, if it is realized. This is called the design engine performance. However, since there is a manufacture error in a variable and a parameter in fact, a thing as predicted is not made. The engine performance in which it is actual for a manufacture error is lower than the design engine performance.

[0015] The word "engine performance" is defined here. Although there are various properties in optical system, the language called engine performance is used as a set of each property. Although each property is measurable, since the engine performance is the set, naturally it is immeasurable. The engine performance is immeasurable unless it is decided which will think which as important among properties and will be made light of. Since the weight of a property is decided suitably, it is possible that the engine performance as a set property is measurable here. Then, it considers as the integrative variable which can measure the engine performance here.

[0016] Each property is decided with the parameter of optical system, and a variable. It is numerous although it becomes variables, such as thickness of a lens, curvature on the rear face of surface, a multiplier of a curved surface, and distance between lenses. A design is deciding the optimum value of these variables for the predetermined purpose. The thing of the variable which fills an equation is only called a "solution" here. When there is a solution about each variable and the set of a solution is given, I hear that the design was made and it is.

[0017] The solution to can be found by forming an equation about a variable which there is the predetermined purpose in optical system and attains this, and solving an equation. However, since there are often few equations than the number of variables, there are many groups of a solution which satisfy an equation. That is, since there are few constraints, there are a lot of solution sets. It comes out, and since it is, a design is not finished only as calculating the solution to. The still more nearly optimal group must be found out from the set of the solution which may be in infinity. This is not decided only from the equation which gives predetermined effectiveness. Regardless of each optical equation, the group of an optimum value is rather decided from a separate viewpoint in many cases.

[0018] A means for that is a performance index. It is excellent [ the engine performance ] to say the square of optical errors, such as beam-of-light aberration and the optical path difference, that this is small, although total is taken in each point. As for the current performance index, emphasis is put on evaluation of aberration. That is, the solution which makes aberration min is decided by the performance index noting that the \*\* value of a variable is known, since aberration is gap of the actual engine performance from the engine performance when the optical system attains the predetermined purpose completely, aberration estimates a solution — a take-in — but it comes out. That is, since the solution which evaluates the engine performance and gives best performance is chosen from the countless solution as that in which even free excelled, it is a direct appraisal method.

[0019] However, it was not evaluated from a viewpoint of a manufacture ease. If the configuration of the lens given by the group of an optimum value can actually be made, though the engine performance which was excellent only in it will be obtained, since there is surely a manufacture error in manufacture of components, the engine performance falls for a manufacture error. It often occurs that the engine performance will fall remarkably although the manufacture errors of a certain parameter are few [ fatal and ] manufacture errors. If it does so, attention must be paid so that a manufacture error may be especially lessened about the parameter. Since there is a manufacture error even if careful, it is necessary to make into a rejection the product which is not in the error range which can be inspected and permitted. Then, the yield becomes high cost low.

[0020] Drawing 4 is the graph with which the optical-system variable was taken along the axis of abscissa, and it took the engine performance downward [ axis-of-ordinate ]. Although there are many optical variables which opt for the engine performance, since it is easy, they are set only to one. Measuring is made possible although the engine performance is also abstract. If a variable is made to \*\*\*\* rightward which will lower a performance index if a RO point is made into initial value when calculating an optimum solution using a performance index for example, it will result in the Ha point. Since this gives the minimum of a performance index, it will be said that it is an optimum solution. However, it results in the HO point which changes initial value, then a variable for a NI point little by little, and makes a performance index min. This is an optimum solution. If a CHI point is made into initial value, a variable will be changed little by little and it will result in a TO point. This will call it an optimum solution. Thus, since there are many variables and there are few constraints and refraction conditions, there are many optimum solutions calculated by performance-index min. And it depends for an optimum solution on initial value. Then, it will be said that selection of initial value is important. However, there is no method of getting to know the optimal initial value.

[0021] I hear that only the engine performance does not come out and another problem has decided the superiority or inferiority between optimum values. If it says from the engine performance, the HO point is superior to the TO point. However, the HO point is a very narrow trough. Performance degradation is remarkable even if there are few manufacture errors, when a HO point is decided on. A TO point is inferior to a HO point in the engine performance. However, since it is in a large trough, when a design value is decided to be a TO point, even if there is a remarkable manufacture error, the engine performance does not fall. When initial value is furthermore in RO, the optimum value which lowered the performance index and reached becomes the Ha point. The manufacture error-engine-performance relation in the Ha point is still looser. When actually manufacturing optical system, a certain manufacture error sticks and it is difficult to make the thing of the desired engine performance very much, since it is a thing, and tolerance is small when a HO point is made into a design value, in contrast — since there is no performance degradation not much even if there are some manufacture errors when a TO point is made into a design value — manufacture — it is easy. Since an allowable error, i.e., tolerance, is small, a HO point is difficult to manufacture, since a TO point and the Ha point have large tolerance — manufacture — it is easy, manufacture — it is better to make into a design value the TO point that tolerance is larger than the HO point that the engine performance is most excellent if it says from a viewpoint referred to as easy, and the Ha point.

[0022] In what kind of optimum value it resulting and ? are based on initial value. However, it is dependent also on the sequence how for it not to be based only on initial value but to move a variable from initial value. It results in the minimum point which is different when the sequence of changing a variable is different. There is optionality in selection of initial value and the sequence of variable change also has various degrees of freedom. It cannot result in the large solution to only in performance-index min. Manufacture is difficult, if tolerance is narrow even if it results in the solution excellent in the engine performance.

[0023] The relation between a manufacture error and the engine performance is abstractly shown in drawing 5. Optimum value x0 Sometimes, the greatest engine-performance (design engine performance) RU is obtained. If there is a manufacture error from an optimum value, the engine performance will descend. Suppose that the minimum engine performance (reference-value engine performance) allowed is NUWO. The error in point NUWO to which a reference value crosses a performance curve is set to tolerance \*\*delta. That is, the manufacture error e corresponding to a part for engine-performance descent permitted will call it tolerance \*\*delta. Since there are many parameters which influence the engine performance, and variables, the tolerance of a certain parameter is large and it may be said about a certain parameter that it is small, optimum value x0 from — the engine performance may dive to gap  $e = (x - x_0)$  When such a parameter exists, even if processing about the parameter requires careful cautions and is careful of them, a defective comes out of it in large quantities. That is, the yield is bad and manufacture is difficult.

[0024] The talk will become intelligible if a thing, such as engine-performance descent  $dS/de$  to a unit manufacture error, is assumed abstractly. Unless the thing of an ideal value can do optical system in which this contains a large parameter, since the engine performance falls remarkably, it is not desirable in fact. The effect of a manufacture error is not understood only by aberration estimating a solution. Then, it is given after an optimum solution is decided, the allowable error, i.e., the tolerance, of each parameter. Similarly, even if thickness is the lens which is 10mm, the case where tolerance is 3 micrometers completely differs from the case where tolerance is 100 micrometers in the difficulty of the manufacture.

[0025] If there is an optimum solution, and there is a group of the tolerance of each parameter, among those there is small tolerance especially, the product in accordance with the optimum solution is difficult to manufacture. There is no view that the difficulty of such manufacture estimates a solution in the conventional optical design evaluation. The conventional appraisal method makes the optimum solution the solution with the small high engine performance of aberration, without making into an optimum solution the solution which is actually easy to manufacture.

[0026] the performance index which uses this invention for the conventional design approach — being different — it — manufacture — it can know whether it is easy and the design approach that manufacture actual as a result makes it possible to ask for the parameter of an easy lens system and optical system is given.

[0027]

[Means for Solving the Problem] The condition S0 that there is no error in all parameters The performance index E0 over a parameter group. The condition S1 that the error of error  $\Delta$  is in at least one parameter, and S2 The performance index E1 over a parameter group of —, E2 Performance-index  $E = w_0 E_0 + w_1 E_1 + w_2 E_2$  which applied suitable weight and added — —  $= \sum w_k E_k$  The optical-system design approach of this invention asks for the group of a parameter which makes and makes this min. The parameter which gives an error is good for manufacturing with high degree of accuracy to choose a difficult parameter. Endowment error  $\Delta$  furthermore given to an error condition is good to make it a larger value than the usual manufacture error.

[0028] Not the manufacture error that appears automatically in process of manufacture but this invention considers the condition S1 of having granted the error positively assumed by the parameter, S2, and —. This error will be temporarily called an endowment error, in order to distinguish from the former manufacture error. Moreover, it is the error condition S1 about the condition of including two or more endowment errors. It is called —. The condition S0 of not giving an error It is called a non-error condition. Sum  $\sum w_k E_k$  with the weight of a performance index It will be called an integrated performance index.

[0029] Drawing 12 explains the thought of the outline of this invention. Condition S0 It is in the ideal condition of not giving an endowment error (non-error condition). It is the performance index E0 It carries out. It is Parameter Pi besides this. The condition of having given error  $\Delta$  is S1 (error condition). It is the performance index of this E1 It carries out. Condition S2 The same parameter Pi It is in the condition which gave the error of  $-\Delta$ . It is the performance index of this E2 It carries out. Parameter Pi If treated as a variable, it will set in these three condition, and it is Parameter Pi. It is set to Pi and Pi  $\Delta$ , and although it differs, other parameters are carried out in common and changed. You may make it grant an error about two or more parameters. In that case, S3 and S4 Many conditions and performance indices E3, E4, and —, such as —, are made. The value of all variables is decided, wave aberration or beam-of-light aberration is searched for, and it is integrated performance-index  $E = \sum w_k E_k$ . A value is calculated and it asks for the group of a variable with which E becomes min. This is optimization count. The variable which calculates E by giving the group of a suitable variable as initial value, and searching for aberration, is made to carry out minute change of the variable, and makes E min is decided.

[0030] A result is estimated that an optical variable is called for. This is performance analysis and tolerance analysis. This invention is the condition S1 of having granted the error, and S2. Since a variable is optimized so that the integrated performance index of — which added the performance index may be made into min, tolerance becomes large about the parameter which gave the endowment error. Since tolerance is large, manufacture becomes easy. Productivity can go up and a manufacturing cost can also be reduced.

[0031]

[Embodiment of the Invention] This invention designs optical system by asking for the variable which builds an integrated performance index in addition to the performance index which is without error in the performance index about some of optical parameters supposing the condition of having granted the error purposely, and minimizes it, it — tolerance — it can extend — manufacture — it becomes easy.

[0032] (1) The parameters which grant an endowment error are the following parameters, for example.

- The multiplier and profile irregularity of the radius of curvature and the aspheric surface of each field (distortion of a field)
- They are main thickness, lens spacing, a refractive index, refractive-index heterogeneity, wedge tilt DISSENTA, etc. When an optical element contains not only a lens but a mirror and other components, those optical parameters are also taken into consideration. The condition of having chosen one or more from these parameters, and having granted the error is assumed. What is necessary is just to choose the parameter with which especially manufacture precision is demanded severely.

[0033] (2) As for error  $\Delta$  which should be granted, a suitable value is set up after taking manufacture precision into consideration. It is desirable to consider as the value beyond the usual manufacture error. Although it is the thing of the actual error generated by chance and is a random variable when manufacturing, it is the semantics of the values (2 sigma values etc.) of the error which may be generated here in the average or probability which exists statistically which is called manufacture error. The endowment error  $\Delta$  is a small condition S1 and S2 Since it will be pulled by the condition and a variable with a performance index small about the condition will be chosen if it is made —, tolerance seldom spreads. However, when the endowment error  $\Delta$  is too large, it is S0, S1, and S2. — Since the difference between conditions becomes large too much, the value of an integrated performance index does not fall. It is necessary to choose the suitable endowment error  $\Delta$ .

[0034] (3) Give initial value to all parameters. This may be the thing of extent of being close to the value to which the value with which are satisfied of an optical equation is not told to, but it satisfies optical to some extent. The optimum value which can reach from it with initial value is influenced. It asks for the variable which changes the value of a variable in the direction in which a performance index decreases from initial value little by little, and makes a performance index min.

[0035] By optimization, when a performance index E does not become small enough, the engine performance is still inadequate or the effect of a manufacture error means that it is strong and tolerance is too small. This can be distinguished by seeing the items of an integrated performance index. If  $w_k E_k / E$  ( $k = 0, 1$  and  $2, \dots$ ) is calculated about each condition Sk, the performance index about each condition has contributed to the whole integrated performance index, or [ how many ] (contribution) it can ask. If the contribution of  $w_0 E_0$  is still large, it is inadequate in the engine performance. If the contribution of  $w_0 E_0$  is low, tolerance means a small thing. The parameter with which tolerance is not loose can be found by whether the contribution of which condition is

high. Thus, initial setting is a bad reason when a performance index  $E$  does not become small. A variable is changed in the direction which improves initial setting and lowers a performance index from new initial value, and repeat count of a performance index is performed again.

[0036] When a performance index does not become small enough by modification of initial value, either, it minimizes changing a variable in the direction which makes the endowment error  $\delta$  somewhat small, initializes it, and reduces a performance index. Finally tolerance cannot become loose. By this invention, tolerance cannot necessarily be loosened at will by any cases. (The optical phenomena as the optical theory, i.e., a natural phenomenon, are not necessarily reversed by this invention.) If a lens with the more high engine performance and optical system are desired, tolerance will become severe to some extent. the range with which this invention is satisfied of the desired engine performance — it is — as much as possible — tolerance — loose — manufacture — it works effectively as an approach of finding out an easy solution efficiently.

(4) Error condition  $S_k$  Case [ many ] (the total  $K$  of  $k$  twice of the total  $I$  of  $i$  of  $P_i$  :  $K=2I$ ) (i.e.,  $P_i$ ) A performance index becomes complicated when a large number are chosen. Count of optimization becomes long and time amount also requires it. If they say that it is troubled, the result of tolerance analysis will be seen, it will limit to the parameter which poses a manufacture top problem, and an error will be granted. If it does so, several  $K$  of an error condition is reduced and computation time can be shortened. That is, I hear that a parameter as for which making a manufacture error small is not made to below the tolerance demanded difficultly is chosen, and it is.

[0037] what has so far been described — even [ an endowment error ] — \*\*\*\*\* — two error conditions were given. Error condition  $S_k$  The following means can also be taken, in order to reduce a number and to extend tolerance moreover. It is the approach of including two different endowment errors in one error condition. for example, parameter  $P_i$  Parameter  $P_j$  choosing — error condition  $S1$   $P_i$  \*\*\*\*\* —  $+\delta_{tai}$  and  $P_j$  \*\*\*\*\* —  $+\delta_{taj}$  \*\* — carrying out — error condition  $S2$   $P_i$  \*\*\*\*\* —  $-\delta_{tai}$  and  $P_j$  —  $-\delta_{taj}$  \*\* — it can carry out. It is referred to as  $S1$  ( $+\delta_{tai}$  and  $+\delta_{taj}$ ) and  $S2$  ( $-\delta_{tai}$  and  $-\delta_{taj}$ ). When it carries out like this, the number of error conditions with two of the class of endowment error is also two. The condition of ( $-\delta_{tai}$  and  $+\delta_{taj}$ ) is excluded with that is, ( $+\delta_{tai}$  and  $-\delta_{taj}$ ). Since the number of error conditions can be reduced by half if it carries out like this, computation time can be shortened. However, it is necessary to choose the combination of the parameter which gives an error and to perform sign selection of an endowment error so that the effect of each error may not negate each other. For example, when the error of both thickness of a certain lens and thickness of other lenses is endowed with one condition, it offsets each other and has the influence of each error, and the performance index over the condition does not have a not much big value, but even if it optimizes, tolerance can seldom be extended. Or it may happen that the same is said also of radius of curvature, thickness and a refractive index, and radius of curvature. In such a case, it is required to choose so that the combination of the sign (+ or -) of an endowment error may be changed, and the effect of each error may not be offset but it may suit in slight strength. Or an error symmetrical with shafts, such as radius of curvature, thickness, and a refractive index, and DISENTA, a tilt and the error that is not axial symmetry like a wedge may be combined.

[0038] (5) The judgment index of tolerance analysis is a certain aberration and optical path difference, or the engine performance in each point in the image surface.

\*\* They are wave aberration, \*\* beam-of-light aberration, \*\*MTF value, \*\* distortion aberration, \*\* f-theta linearity, \*\* focal distance, etc. \*\* It is the special engine performance which can be used only for a f-theta lens. It is made for increase of the wave aberration by error increase to be  $\lambda/100$  (for  $\lambda$  to be wavelength) or less in the case of wave aberration (\*\*). The value of a suitable limitation is decided also about other \*\*s — \*\*. The gap (error) from the set point (design value) of a parameter which gives the threshold value is tolerance.

[0039] Drawing 6 shows the design method by the performance-index minimization by the conventional method. It is a manufacture error about a parameter with an axis of abscissa, and an axis of ordinate is the engine performance. In initial value, the engine performance is low. A variable is changed and it goes so that a performance index may become smaller from now on. Although O is written upward from initial value, it is in the condition that this has been improved asymptotically. When the target parameter is treated as a variable and a value changes, as shown in drawing 4, the reference value of a variable itself is changed and the engine performance rises. Transition of O from the initial value of drawing 6 to optimum-solution YO is expressing a thing like change of HO from NI of drawing 4. An optimum solution is E0. It is the group of the variable made into min. This gives best performance, when a variable is changed starting with a certain initial value. However, from TA, although tolerance is small and gives a reference performance only by yotta \*\*, if it shifts, the engine performance will fall notably.

[0040] Drawing 7 shows the design approach by the integrated performance-index minimization by the approach of this invention. Initial value is chosen as arbitration. A variable is fluctuated so that an integrated performance index may be reduced from initial value. Optimum-value RE gives the minimum value. Since an integrated performance index including an error condition is treated, tolerance FU becomes large. The engine performance which can be satisfied even if a manufacture error is between reflexs widely can be given.

[0041] It is, among those many parameters which determine optical system are  $P_i$ . Error  $\delta$  is given only to a parameter. + The condition  $S1$  of having given the error of  $\delta$  Performance index  $E1$  It is contained in an integrated performance index. It is  $E1$  when minimizing an integrated performance index. Naturally it should become small.  $E1$  Even if there is error  $+\delta$ , I hear that that it is small has chosen the group of a variable which has little degradation, and there is. Therefore, parameter  $P_i$  Tolerance becomes large. Intuitively, it is such a thing. However, certification with this strict cannot be performed. It is because a parameter is various and extent of the intervention to an optical equation is also various. About the other parameter, it is not known beforehand whether tolerance spreads or it becomes narrow. It is not understanding, unless it actually calculates. There are some some which become large, and the tolerance of the other parameter has some some which become small, and has some which seldom change. Other parameters which become large or seldom change are satisfactory at all. Moreover, even if other parameters which were big tolerance from the first become small somewhat, the problem on manufacture is not produced. Temporarily, although it is the case where the tolerance of other parameters becomes small and it becomes impossible for manufacture precision to satisfy the tolerance, when the tolerance of other parameters becomes severe, becoming a problem adds the condition of having granted the error also to the parameter, it newly creates an integrated performance index, and can be solved by optimizing again.

[0042]

[Example] The optical system which is applicable may be what kind of thing. Here, it shows that give \*\*\*\* of a double sign about various parameters, calculate an optimum solution which makes a performance index min, and tolerance becomes large about a f-theta lens as an example.

[0043] (A) Two initial lens setting O lens number of sheets Quality of the material ZnSe (refractive index  $n = 2.403$ )

The 1st lens The 1st page is the aspheric surface and the 2nd page is the 2nd lens of the spherical surface. The 1st page is the spherical surface. The 2nd page is aspheric surface O wavelength. 10.6 micrometer O entrance pupil location It is the \*\*\*\* side 50mm O f number in the 1st page of the 1st lens. 6 O incident angle 0 degree, 8 degrees, and 16-degree f-theta lens are lenses which carry out image formation of the beam of light which carried out incidence at the include angle which makes theta from an optical axis to the location which only ftheta separated from the core of the image surface. Optical system is shown in drawing 18. Two lenses are used. If parallel light is put into a lens 1 by the angle of inclination of certain theta, the beam of light which came out of the lens 2 will be converged on the point which ftheta is distant from a core in the image surface. For example, theta= 0-degree parallel light KE, FU, and KO are converged on the J point on an optical axis. Image formation of theta= 8-degree parallel light TE, A, and SA is carried out to K locations of 8xL in the image surface. theta= 16-degree parallel light ME, MI, and Si do image formation to M locations of 16xL in the image surface. L is a constant here. Although only three beams of light are written, respectively, it is being completed as one point by the countless parallel ray in fact.

[0044] (B) They are the radius of curvature of variable setting each field (there is the 4th page), thickness (spacing), an aspheric surface multiplier, and an image surface location. Since a lens sets to two, four radius of curvatures exist as a variable. About thickness, there are thickness of two lenses and distance between lenses. Since the 1st page of the 1st lens and the 2nd page of the 2nd lens are considering as the aspheric surface, an aspheric surface multiplier turns into a variable about each. This is [0045].

[Equation 1]

$$Z = \frac{c r^2}{1 + \{1 - (1+k) c^2 r^2\}^{1/2}} + \sum \alpha_j r^{2j} \quad (1)$$

[0046] Thus, the cone constant (conic constant) k and a radius r describe the eventh order, and it is multiplier alphaj of \*\*. c is top-most-vertices curvature (Vertex curvature). For example, alpha will become four parameters if it takes like the 4th order [ 6th / 8th / 10th ] of r. An image surface location is the distance of the image surface from the 2nd lens. Thus, since there are many variables, it is necessary to judge the propriety of a variable by the performance index.

[0047] (C) Constraint focal distance 127mm, lens thickness 3.5mm or more 15mm or less [0048] (D) Setting 1. DISENTA [ — Multiplier 5. profile irregularity of the two aspheric surfaces (distortion of a field) ] with error .... Gap 2. tilt from the optical axis of a lens medial axis ... Radius of curvature of inclination 3. each field of a lens — Radius-of-curvature 4. aspheric surface multiplier of the spherical surface on the rear face of front

6. Refractive Index — Gap 7. Refractive-Index Heterogeneity from Predetermined Value of Overall Refractive Index of ZnSe Lens — Fluctuation 8. Wedge of Local Refractive Index [0049] It is \*\*\*\*. One or more parameters which should grant an error are chosen from these. For example, it is as follows supposing it gives an endowment error only to DISENTA. That is, performance index E0 in case there is no lens gap (S0) The case (S1) (S2) where there is axial gap of the lens of \*\*delta is assumed, and it is each performance index E1 and E2. It asks for the optimal variable group which calculates for every group of a variable and makes the sum of a performance index min. The whole performance index E is weight w0, w1, and w2. It hangs and considers as the sum total of this.

$$E = w_0 E_0 + w_1 E_1 + w_2 E_2 \quad (2)$$

It comes out. Weight w0, w1, and w2 You may decide freely.

[0050] Here, it is referred to as w0 = w1 = w2 = 1. Therefore, a performance index is only E = E0 + E1 + E2. (3)

It comes out. DISENTA error \*\*delta which should be granted gives a suitable value in consideration of the level of manufacture precision. It is better to make an endowment error into a larger value than a manufacture error.

[0051] You may make it give an error to the other parameters other than a DISENTA error. For example, \*\*1% of error is given to the radius of curvature of the 1st page of an one-sheet eye lens. When it does so, they are S3 and S4. The condition of saying increases. Since the sum of five performance indices is made, it asks for the group of a variable which makes this min. It is S0, when it is made such, the group of the optimal variable is called for and DISENTA tolerance and radius-of-curvature tolerance are searched for. It is increasing rather than the tolerance at the time. Since tolerance is large, manufacture becomes easy.

[0052] As a performance index, for example, beam-of-light aberration is adopted. Of course, other optical errors, such as wave aberration, may be used for a performance index. If aberration is in a lens, the beam-of-light groups which should be ideally converged on one point on the image surface will be scattered here and there, and will arrive at the image surface. The sum of squares of gap of each beam of light is taken, and it is made into the performance index.

[0053] Drawing 19 is an example which shows distribution of the beam of light on an entrance pupil (entrance pupil). Here, an entrance pupil may be considered to be the cross section of the light which carries out incidence to a lens. One in an entrance pupil means one beam of light. In order to raise the precision of count, there are many beams of light and make it better [ to be widely distributed over the whole pupil although a favorite number of beams of light may be taken in the location on the pupil of arbitration (Px and Py) ]. (Px and Py) show the coordinate on a pupil here. The magnitude of a pupil is normalized and is expressed with the circle of a radius 1. However, in order to optimize quickly by reducing computational complexity, there must not seldom be too many beams of light. What is shown in drawing 19 is an example which takes 18 beams of light. Six straight lines extended from the core of a pupil to a radial are taken (respectively whenever [ 0 ], the direction of 60 degrees, 120 degrees, 180 degrees, 240 degrees, and 300 degrees), and three rings from which magnitude differs further are taken. the radius R of three rings — respectively — R = 0.3357 and 0. — it is 7071 and 0.9420. A total of 18 beams of light are taken at the intersection of these six radiations and three rings. wj = 0.048481 (12) and monochrome round head set [ a black dot ] weight of each beam of light to wj = 0.07757 (6).

[0054] If it calculates at what kind of location each beam of light varies and arrives in the image surface, the location gaps delta x and delta y can be found. delta x and delta y are x components and y components of gap from a center-of-gravity location of all beams of light. f (2 f = 1, 3) shows 0 times, 8 times, and 16 degrees for each beam of light whenever [ j (j = 1, 2, —, 18) and incident angle ], and the weight wj for every beam of light is obtained. Weight wf for whenever [ incident angle / every ] It hangs and is one condition Sk. Receiving performance index Ek (although it omits since the case of single wavelength is treated here) When treating the light of two or more wavelength, weight wlambda will be hung also on each wavelength and the sum will be taken. Sk Receiving Ek Ek = sigmasigmawf wj (delta xj2 + delta yj2) (4)

It carries out. This gives the performance index E0 of each condition S0, S1, S2, and —, E1, E2, E3, and —. This invention is the non-error condition S0. The endowment error condition S1 which granted the error, S2, and S3 Since each performance index is added, it is each condition Sk. It is wk about weight. Carrying out, the integrated performance index E is E = sigma wk Ek

$=\sum w_j (\Delta x_{kfj}^2 + \Delta y_{kfj}^2)$  (5)

It becomes. A variable is fluctuated so that this may be made to minimize.

[0055] The above-mentioned performance index can estimate the convergence property of light with a lens. However, it is necessary to make evaluation possible [ about  $f$ -theta-related linearity ] as another important property in the design of a  $f$ -theta lens. Since (4) makes the error beam-of-light location gap by the image surface,  $f$ -theta linearity evaluation is not included in this. In the case of a  $f$ -theta lens, it is necessary to attain optimization so that a performance index may be devised further and the linearity between good  $f$ -theta may be acquired.

[0056] For example, the location  $hJ$  ( $= 0$ ) of each foci J, K, and M in the image surface when taking whenever [ three incident angle 0 times, 8 times, and 16 degrees, ],  $hK$ , and  $hM$  It asks by count by carrying out ray tracing about the parameter of the optical system in the time. Since it changes with the twice as many include angle as this exactly 16 degrees to 8 times whenever [ incident angle ] at this time, if linearity is realized in ideal  $f$ -theta, it will be  $2hK = hM$ . It should become. Then, it is  $EL = (2hK - hM)^2$  (6) as a function by which the linearity of  $f$ -theta is evaluated.

\*\*\*\*. If whenever [ incident angle / than three / more ] are set up, many functions like a formula (6) are stood and those total is taken, the linearity of  $f$ -theta can also be evaluated in a detail. The value of a variable is optimized so that a performance index like a formula (6) may also be minimized to a formula (5) and coincidence.

[0057] Moreover, you may incorporate into a performance index also about the constraint of a focal distance, the thickness range of a lens, etc. In order to make a focal distance  $f$  into the target value, for example, 127mm, it is  $e1 = (f - 127)^2$ . (7)

The performance index expressed be alike can be taken. In order to make thickness  $t$  of a lens into the less than range of target, for example, 3.5mm or more 15mm, it is a performance index.  $e2 = \alpha(t - 3.5)^2 + \beta(t - 15)^2$  (8)

\*\*\*\*. However, a multiplier  $\alpha$  shall take the value of  $\alpha = 1$  at the time of  $\alpha = 0$  and  $t < 3.5$ mm at the time of  $t > 15$ mm.

Similarly a multiplier  $\beta$  shall take the value of  $\beta = 1$  at the time of  $\beta = 0$  and  $t > 15$ mm at the time of  $t < 3.5$ mm.

Therefore, thickness  $t$  is set to 0 by 3.5mm - 15mm, and this will become a forward value if it separates from this range. Thus, a performance index can also express a constraint. It is the respectively suitable weight  $w_c$  about the performance index  $e1$ ,  $e2$ ,  $\rightarrow$  about such a constraint. By hanging and adding, it collects into the performance index  $E_c$  about all constraints, and is  $E_c = \sum w_{ce} e_c$ . (9)

It becomes.

[0058] Total of three performance indices (5) as shown above, (6), and (9) is taken, and an integrated performance index is completed. The suitable weight  $w_A$ ,  $w_L$ , and  $w_C$  It hangs and total is taken. Integrated performance index  $E = w_A \sum w_k E_k + w_L EL + w_C EC$  (10)

It becomes. Weight  $w_A$ ,  $w_L$ , and  $w_C$   $\sum w_k E_k$ ,  $EL$ , and  $EC$  It works so that each performance index may be made to minimize with sufficient balance. Here, it is  $E = \sum w_k E_k + EL + EC$  as  $w_A = w_L = w_C = 1$  simply. (11)

It carries out. Count which optimizes a variable so that this integrated performance index may be minimized is performed. In addition to the beam-of-light aberration in each condition, by calculating an optimum solution, the group of the parameter value which becomes the best about each of  $f$ -theta linearity and a constraint is called for.

[0059] The conventional approach is followed first and it is S0. The optimum design of a case is carried out. a performance index  $E = E0 + EL + EC$  it is. This is shown in drawing 8. The light which came out of the light source is deflected by deviation equipments, such as a polygon mirror and a galvanometer mirror, carries out incidence to a lens by whenever [ incident angle / which is decided by that cause ], is extracted with a lens, and is converged on the image surface. This number is arbitrary although three deflected light is shown as an example here. The curvature of a lens, thickness, etc. become a variable. Lens spacing will also be a variable if there are two or more lenses. Since the fixed restriction is imposed on the configuration of a lens, the dimension, etc., a variable is variously changed in the range. This calculates [ DISENTA ] a performance index for radius of curvature etc. according to a conventional method, without giving an error. The value (the optimal) of the variable with which a performance index becomes min is calculated. From now on, the tolerance of a variable will be searched for. According to it, DISENTA tolerance was \*\*40 micrometers. The radius-of-curvature tolerance of the 1st lens is \*\*0.066%. Any tolerance is small and difficult to manufacture.

[0060] S0 without a [example 1 (\*\*160-micrometer DISENTA)] DISENTA error Two error grant conditions other than a condition are considered. An explanatory view is shown in drawing 9. As a variable of optical system, there are curvature on the rear face of front of a lens, lens thickness, lens spacing, etc. The case where there is no DISENTA is shown in the left. The beam of light from the light source is converged on three locations with a lens. It is the performance index of that E0 It carries out. In this case, not wave aberration but beam-of-light aberration is adopted. Whenever [ incident angle ] is the direction of 0 times, 8 times, and 16 degrees.

[0061] The condition of having given \*\*160 micrometers of DISENTA errors is set to S1 (-160 micrometers) and S2 (+160 micrometers). Beam-of-light aberration is adopted also about these. It is a performance index in each case E0, E1, and E2 It carries out. An optical variable is given to each condition. The restriction is imposed on the configuration, the dimension, etc. A variable is changed within a restriction and it is integrated performance-index  $E = E0 + E1 + E2 + EL + EC$ . It asked for the group of the variable which calculates and makes min this ( $1 \leq k \leq 2$ ). The DISENTA tolerance in that case was \*\*202 micrometers as a result of tolerance analysis. Since tolerance increases large about 5 times, manufacture becomes easy. It does not come out so much and the engine performance also improves.

[0062] Drawing 20 is an example of the result of having carried out analysis evaluation of the property by simulation about the  $f$ -theta lens decided with the optical parameter which minimized and searched for the performance index of a non-error condition with the conventional method.

[0063]

[Table 1]

従来例 1 のレンズデータ

| レンズ<br>番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm)  | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率      |
|-----------|-----|---------------|---------------|----------|
| L 1       | S 1 | 表 2           | 4. 2 2 8      | 2. 4 0 3 |
|           | S 2 | -6 4. 0 5 8   | 6. 3 8 9      |          |
| L 2       | S 3 | -5 4 8. 0 6 7 | 1 3. 9 7 3    | 2. 4 0 3 |
|           | S 4 | 表 2           | 1 6 2. 7 2 2  |          |

[0064]

[Table 2]

従来例 1 の非球面データ

| 面<br>番号 | 1 / c<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|---------|---------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1      | -35.661       | -1.234 | -2.493E-6  | -2.517E-10 | 3.056E-13  | -1.154E-15 |
| S4      | -67.083       | -0.828 | 3.407E-7   | 3.776E-11  | -1.691E-14 | -3.797E-18 |

[0065] 160 micrometers of DISENTA errors are granted as a manufacture error, and a contour line shows the intensity distribution of the condensing spot in the image surface at that time. This is the result of calculating a point spread function (point spread function) about the case where whenever [ J point / of drawing 18 / , K point, and M point, i.e., incident angle. ] are 0 times, 8 times, and 16 degrees. The form of a sharp crest which becomes low is displayed with the contour line as the reinforcement of a condensing spot has a high core and it spreads outside in drawing 20 . Most spots of 0 times (J point) are high lines, such as being close to a perfect circle. The spot of 16 degrees (M points) is distorted for a long time in the ellipse form to it. This shows that a spot is distorted like M points as whenever [ incident angle ] becomes large, and a good property is not acquired by 160 micrometers of set-up DISENTA errors.

[0066] It is the result of taking the integrated performance index which set up the error condition with which drawing 21 , on the other hand, endowed \*\*160 micrometers of DISENTA errors by this invention, setting up 160 micrometers of DISENTA errors like the above about the f-theta lens decided with the optical parameter which minimized and asked for it, and carrying out simulation of the property.

[0067]

[Table 3]

実施例 1 のレンズデータ

| レンズ<br>番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm)  | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率      |
|-----------|-----|---------------|---------------|----------|
| L 1       | S 1 | 表 4           | 4. 7 5 5      | 2. 4 0 3 |
|           | S 2 | -7 3. 0 0 8   | 7. 2 1 1      |          |
| L 2       | S 3 | -2 8 2. 3 1 5 | 1 2. 9 5 1    | 2. 4 0 3 |
|           | S 4 | 表 4           | 1 6 3. 2 4 1  |          |

[0068]

[Table 4]

実施例 1 の非球面データ

| 面<br>番号 | 1 / c<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|---------|---------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1      | -39.877       | -2.308 | -4.698E-6  | 3.492E-10  | -3.413E-13 | -7.573E-16 |
| S4      | -83.627       | -0.242 | 1.239E-7   | 4.338E-11  | 2.666E-15  | -4.085E-18 |

[0069] With this lens, since the tolerance of DISENTA is loose to \*\*202 micrometers, even if there is a 160-micrometer DISENTA error, neither of 0 times, 8 times, and 16 degrees of the spots is distorted whenever [ incident angle ], but the contour line symmetrical with rotation of a perfect circle form is drawn. It turns out that this invention is excellent as compared with the conventional method of drawing 20 .

[0070] \*\*160 micrometers of [example 2 (DISENTA error [ of \*\*160 micrometers ], and \*\*1% of radius-of-curvature error; the 1)] DISENTA errors — in addition, \*\*1% of error was endowed with the radius of curvature of the 1st page of the 1st lens.

[0071]

[Table 5]

実施例2のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm)   | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率      |
|-------|-----|-------------|------------|----------|
| L 1   | S 1 | 表 6         | 4. 7 8 8   | 2. 4 0 3 |
|       | S 2 | -77. 3 2 3  | 6. 7 4 6   |          |
| L 2   | S 3 | -287. 0 4 2 | 12. 9 8 1  | 2. 4 0 3 |
|       | S 4 | 表 6         | 163. 6 9 6 |          |

[0072]

[Table 6]

実施例2の非球面データ

| 面番号 | 1/c (mm) | k      | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | $\alpha_5$ |
|-----|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -40.189  | 0.013  | -2.338E-7  | -3.330E-11 | 3.449E-13  | -7.662E-16 |
| S4  | -82.100  | -0.756 | -1.574E-7  | 1.876E-11  | -7.220E-16 | -5.573E-18 |

[0073] S1 (-160 micrometers), S2 (+160 micrometers), S3 (-1%), and S4 (+1%) and S0 It is performance-index  $E=E0+E1+E2+E3+E4+EL+EC$  about five added conditions. It asked for the group of the variable which calculates and makes this min. The radius-of-curvature tolerance of the 1st page of the 1st lens in this case became \*\*0.770%. S0 since it is increasing to 10 or more times of the tolerance of a design conventionally only treating a condition — manufacture — it becomes easy. Moreover, the tolerance of DISENTA was also set to \*\*180 micrometers, and a design is conventionally larger than \*\*40 micrometers, and it was eased.

[0074] \*\*1% of error was given to the radius of curvature of the 1st page of the 1st lens at \*\*160 micrometers of [example 3 (DISENTA error [ of \*\*160 micrometers ], and \*\*1% of radius-of-curvature error; the 2)] DISENTA errors, and coincidence.

[0075]

[Table 7]

実施例3のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm)   | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率      |
|-------|-----|-------------|------------|----------|
| L 1   | S 1 | 表 8         | 5. 1 1 7   | 2. 4 0 3 |
|       | S 2 | -73. 8 8 4  | 8. 7 8 8   |          |
| L 2   | S 3 | -282. 9 8 9 | 12. 9 9 6  | 2. 4 0 3 |
|       | S 4 | 表 8         | 163. 1 6 6 |          |

[0076]

[Table 8]

実施例3の非球面データ

| 面番号 | 1/c (mm) | k      | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | $\alpha_5$ |
|-----|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -42.181  | -0.004 | -1.784E-7  | -5.900E-10 | 1.521E-12  | -1.947E-15 |
| S4  | -67.600  | -0.596 | -5.942E-8  | -2.302E-11 | 3.611E-14  | -1.850E-17 |

[0077] S1 (-160 micrometers - 1%), and S2 (+160 micrometers, +1%) and S0 It is performance-index  $E=E0+E1+E2+EL+EC$  about three added conditions. It asked for the group of the variable which calculates and makes this min. In this case, the radius-of-curvature tolerance of the 1st page of the 1st lens was set to \*\*201 micrometers by DISENTA tolerance with \*\*0.645%. S0 since it becomes about 5 times as much tolerance as the DISENTA tolerance of a condition and is increasing by about 10 times about radius of curvature — manufacture — it becomes easy.

[0078] [Example 4 (the lens thickness of \*\*0.2mm, lens spacing error)] It was a thing about a DISENTA error and the error of the radius of curvature of a lens which was described until now. Next, the error was given to lens thickness and lens spacing, the performance index was made, and this was minimized.

[0079]

[Table 9]



実施例4のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm)     | 厚み、間隔 (mm)   | 屈折率      |
|-------|-----|---------------|--------------|----------|
| L 1   | S 1 | 表 1 0         | 4. 3 3 1     | 2. 4 0 3 |
|       | S 2 | -8 3. 2 7 7   | 4. 8 8 8     |          |
| L 2   | S 3 | -3 1 3. 9 1 9 | 1 3. 1 7 3   | 2. 4 0 3 |
|       | S 4 | 表 1 0         | 1 6 4. 5 9 1 |          |

[0080]

[Table 10]

実施例4の非球面データ

| 面番号 | 1/c (mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -37.641  | -0.075 | -5.120E-7  | 4.102E-10  | -1.307E-13 | -5.386E-16 |
| S4  | -56.159  | -0.489 | -4.947E-9  | 1.217E-10  | -2.974E-14 | 1.304E-18  |

[0081] There are the six conditions of having given the error, the condition that the condition of having given the  $\pm 0.2$ mm error about the thickness of the 1st lens gave the  $\pm 0.2$ mm error to S1, S2, and lens spacing — S3 and S4 it is . the condition of having given the  $\pm 0.2$ mm error to the 2nd lens thickness — S5 and S6 it is . And integrated performance-index  $E=E_0+E_1+E_2+E_3+E_4+E_5+E_6+EL+EC$  It asked for the group of a variable which is made into min.  $E_0$  In the case of the group of only the variable made into min, the tolerance of lens thickness and spacing was  $\pm 0.08$ mm, but in the group of the variable which makes min the integrated performance index in the condition of including six errors, the tolerance of thickness spacing increased to  $\pm 0.23$ mm, since tolerance has increased about 3 times — more — manufacture — it is an easy translation.

[0082] The 1st lens of [an example 5 (refractive-index error of 0.02 [  $\pm$  ])] and the 2nd lens use the ingredient for the infrared light of ZnSe, a refractive index considers the condition of having given the refractive-index error of 0.02 [  $\pm$  ] to this, although being referred to as 2.403 usually comes out.

[0083]

[Table 11]

実施例5のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm)     | 厚み、間隔 (mm)   | 屈折率      |
|-------|-----|---------------|--------------|----------|
| L 1   | S 1 | 表 1 2         | 4. 5 1 1     | 2. 4 0 3 |
|       | S 2 | -6 1. 9 5 0   | 7. 7 7 3     |          |
| L 2   | S 3 | -4 5 8. 3 1 1 | 1 3. 7 7 1   | 2. 4 0 3 |
|       | S 4 | 表 1 2         | 1 6 1. 3 5 4 |          |

[0084]

[Table 12]

実施例5の非球面データ

| 面番号 | 1/c (mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -37.381  | -0.080 | 4.417E-7   | 3.431E-10  | 8.272E-15  | 7.625E-17  |
| S4  | -71.995  | -1.055 | 8.115E-9   | 3.323E-12  | -7.892E-15 | 3.582E-19  |

[0085] S0 It is in a condition without a refractive-index error. S1 The condition and S2 which have the error of +0.02 in the refractive index of the 1st lens The condition and S3 which have the error of -0.02 in the refractive index of the 1st lens The condition and S4 which gave the error of +0.02 to the refractive index of the 2nd lens It is in the condition which gave the error of -0.02 to the refractive index of the 2nd lens. The performance index of these five conditions is set to  $E_j$  ( $j=0, \dots, 4$ ).

Integrated performance-index  $E=E_0+E_1+E_2+E_3+E_4+EL+EC$  It asked for the optical variable made into min. S0 which does not give an error The refractive-index tolerance over the variable which makes an integrated performance index min to the variable for which it asked as min although refractive-index tolerance is  $\pm 0.00782$  was  $\pm 0.0115$ . It is increasing about 50 percent.

[0086] the lens thickness of the [example 6 (lens thickness spacing error [ of  $\pm 0.2$ mm ], and tilt error of  $\pm 10$  minutes)] example 4, and spacing — in addition, what granted  $\pm 10$  minutes as a tilt error of a lens is considered. Although the tolerance of lens thickness and spacing became loose in the example 4, the tolerance of a tilt became severe in the example 4 to  $\pm 10.7$  minutes of a conventional method in  $\pm 3.8$  minutes conversely. So, this example shows that also grant the error of a tilt in addition to lens thickness and spacing, and all the tolerance of them increases.

[0087]

[Table 13]

実施例6のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm)      | 厚み、間隔 (mm)   | 屈折率      |
|-------|-----|----------------|--------------|----------|
| L 1   | S 1 | 表 1 4          | 4. 4 5 9     | 2. 4 0 3 |
|       | S 2 | - 7 1. 7 5 1   | 6. 2 4 9     |          |
| L 2   | S 3 | - 3 1 4. 9 3 2 | 1 3. 1 8 9   | 2. 4 0 3 |
|       | S 4 | 表 1 4          | 1 6 3. 4 3 9 |          |

[0088]

[Table 14]

実施例6の非球面データ

| 面番号 | 1 / c (mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -37.873    | 0.064  | 2.449E-7   | 2.461E-10  | 7.303E-13  | -8.252E-16 |
| S4  | -61.758    | -0.514 | 8.815E-8   | 4.215E-11  | 2.604E-15  | -8.652E-18 |

[0089] S1 -S6 It is the same as an example 4. S1 and S2 The condition which gave the \*\*0.2mm error about the thickness of the 1st lens, S3, and S4 It is in the condition which gave the \*\*0.2mm error to lens spacing, S5 and S6 It is in the condition which gave the \*\*0.2mm error to the 2nd lens thickness. S7 The tilt error of +10 minutes is endowed with the 1st lens, S8 It is in the condition which endowed the tilt error of - 10 minutes with the 1st lens, S9 The condition which gave the tilt error of +10 minutes to the 2nd lens, and S10 give the tilt error of - 10 minutes to the 2nd lens. As those performance indices, E1 -E10 are made to correspond and it is integrated performance-index  $E=E0+E1+...+E9+E10+EL+EC$  It thinks. Performance-index  $E=E0+E1+$  which has not granted the tilt error ...  $+E6+EL+EC$  In the case of the example 4, tilt tolerance was \*\*3.8 minutes. When tilt error \*\*10 minutes were added here, tilt tolerance increased in \*\*8.1 minutes. since it is increasing twice [ about ] -- manufacture -- it is easy. The tolerance of lens thickness and lens spacing was set to \*\*0.25mm.

[0090] \*\*5 minutes was set up as a wedge error of the 2nd lens of [an example 7 (wedge error of \*\*5 minutes)].

[0091]

[Table 15]

実施例7のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm)    | 厚み、間隔 (mm)   | 屈折率      |
|-------|-----|--------------|--------------|----------|
| L 1   | S 1 | 表 1 6        | 3. 5 0 0     | 2. 4 0 3 |
|       | S 2 | - 4 9. 1 6 5 | 8. 4 4 4     |          |
| L 2   | S 3 | 無限大          | 9. 9 7 6     | 2. 4 0 3 |
|       | S 4 | 表 1 6        | 1 5 7. 7 0 1 |          |

[0092]

[Table 16]

実施例7の非球面データ

| 面番号 | 1 / c (mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -31.575    | -0.257 | 1.359E-6   | 7.887E-10  | -2.193E-13 | 3.206E-16  |
| S4  | -79.449    | -1.711 | 8.480E-7   | -1.534E-10 | 1.126E-14  | 3.109E-19  |

[0093] S1 It is in the condition which granted the wedge error of +5 minutes. S2 It is in the condition which granted the wedge error of - 5 minutes. Conventional method E0 In evaluation, the wedge error was \*\*1.9 minutes.  $E=E0+E1+E2+EL+EC$  Wedge tolerance has been improved by making it min in \*\*2.7 minutes. since it expands for 0.8 minutes -- manufacture -- it becomes easy.

[0094] The [example 8 (heterogeneity of refractive-index distribution)] lens has calculated having assumed that it had a fixed refractive index. About fluctuation of the whole refractive index, what granted the error of 0.02 [ \*\* ] in the example 5 was explained. Here, the not fluctuation but spatial heterogeneity of a uniform refractive index are treated.

[0095]

[Table 17]

実施例 8 のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm)    | 厚み、間隔 (mm)   | 屈折率      |
|-------|-----|--------------|--------------|----------|
| L 1   | S 1 | 表 1 8        | 3. 5 0 0     | 2. 4 0 3 |
|       | S 2 | - 5 1. 4 0 9 | 6. 8 1 7     |          |
| L 2   | S 3 | 無限大          | 1 0. 2 5 1   | 2. 4 0 3 |
|       | S 4 | 表 1 8        | 1 5 7. 6 2 9 |          |

[0096]

[Table 18]

実施例 8 の非球面データ

| 面番号 | 1 / c (mm) | k       | $\alpha_1$ | $\alpha_2$  | $\alpha_3$  | $\alpha_4$ |
|-----|------------|---------|------------|-------------|-------------|------------|
| S1  | -31. 225   | -0. 217 | 1. 870E-6  | 1. 242E-9   | -1. 490E-13 | 3. 946E-16 |
| S4  | -73. 378   | -2. 088 | 6. 580E-7  | -1. 582E-10 | 2. 090E-15  | 1. 325E-18 |

[0097] Suppose that there is a refractive-index ununiformity depending on a radius which is expressed by the 2nd lens by the following formula.

[0098]

$$n=n_0 +Ar^2 +Br^4 \ (r=(x^2 +y^2 )^{1/2} ) \ (12)$$

$n_0=2.403$  S0 It is in the refractive-index homogeneity condition of  $A=0$  and  $B=0$  ( $n=n_0$ ). S1  $A=+5 \times 10^{-7}$  and  $B=-4 \times 10^{-10}$  It is in the condition of a refractive-index ununiformity. S2  $A=-5 \times 10^{-7}$  and  $B=+4 \times 10^{-10}$  It is in the condition of a refractive-index ununiformity. S0 Performance index E0 In what was minimized, the tolerance of a refractive-index ununiformity (inhomogeneity) was  $\pm 0.0000193$ . This invention is followed and it is integrated performance-index  $E=E_0+E_1+E_2+EL+EC$ . Refractive-index heterogeneity tolerance has been improved for what minimized and optimized the variable by  $\pm 0.0000267$ . It means that tolerance had increased about 40 percent.

[0099] [Example 9 (aspheric lens)] It is asking for a variable which endows an error with a parameter which is [ condenser lens / of an aspheric lens simple next ] different in examples 1-8 at an example, sets up a performance index, and minimizes it, and it is shown that the case [ tolerance ] of a f-theta lens becomes the same greatly.

[0100] (A) Initial lens setup.

One lens number of sheets Quality of the material ZnSe (refractive index  $n=2.403$ )

The 1st page is the convex aspheric surface and the 2nd page is the concave spherical surface.

Wavelength Diameter of 10.6-micrometer entrance pupil Whenever [  $\phi 50.8$ mm incident angle ] 0 times (only vertical incidence)

A lens has a meniscus configuration by the product made from ZnSe, and the 1st page is the aspheric surface. It is only that parallel light carries out vertical incidence of the incident light by infrared light with a wavelength of 10.6 micrometers.

[0101] (B) Let variable setting 1st, the radius of curvature of the 2nd page, an aspheric surface multiplier (k,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ , and  $\alpha_4$ ), thickness, and an image surface location be variables.

[0102] (C) Constraint focal distance 95.25mm lens thickness The error (Fringes Irregularity) of 3mm or more 12mm or less profile irregularity is made an issue of. This is gap from an ideal curved surface. helium-Ne laser with a wavelength of 0.633 micrometers can be measured using an interferometer suitable as criteria wavelength. The magnitude of gap is expressed with the number of an interference fringe. For example, the case where there is gap of curvature in each cross section of the direction of a x axis and the direction of the y-axis as shown in drawing 15 is considered. The shaft of a lens is made into the z-axis here, and the X-axis and a Y-axis are taken in a field perpendicular to the z-axis. That is, a cylindrical distortion which is not the symmetry of revolution has arisen. At this time, an interference fringe becomes like drawing 16. The difference of the number of the stripes of a lengthwise direction and a longitudinal direction is taken, and distortion of a field is expressed.

[0103]

[Table 19]

従来例 2 のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm)    | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率      |
|-------|-----|--------------|------------|----------|
| L 1   | S 1 | 表 2 0        | 5. 5 1 8   | 2. 4 0 3 |
|       | S 2 | 1 8 4. 5 6 5 | 9 1. 3 5 9 |          |

[0104]

[Table 20]

従来例 2 の非球面データ

| 面番号 | 1/c<br>(mm) | k      | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | $\alpha_5$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | 78.854      | -0.637 | 9.892E-8   | 2.658E-11  | -5.060E-14 | 4.251E-17  |

[0105] The condition S0 of not including a profile irregularity error Included performance-index  $E=E_0+E_c$ , in the group (conventional example 2) of the variable made into min, the number of profile irregularity tolerance was \*\*2.97.

[0106] The condition S1 that there is a cylindrical profile irregularity error in which a \*\*five striped number appears according to the thought of this invention, and S2 It assumes and is these performance indices E1 and E2. Added integrated performance-index  $E=E_0+E_1+E_2+E_c$  It asked for the variable made into min (example 9).

[0107]

[Table 21]

実施例 9 のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表22          | 5.519         | 2.403 |
|       | S2  | 157.562      | 91.092        |       |

[0108]

[Table 22]

実施例 9 の非球面データ

| 面番号 | 1/c<br>(mm) | k      | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | $\alpha_5$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | 73.777      | -0.652 | 1.584E-7   | -9.697E-11 | 3.263E-13  | -2.681E-16 |

[0109] According to this, the tolerance of profile irregularity has been improved by even \*\*4.67.

[0110]

[Effect of the Invention] parameter Pi of one or more [ this invention ] among optical parameters \*\*\*\*\* — the condition S1 of having included the error of \*\*delta, and S2 — thinking — these performance indices E1, E2, and — non-error condition S0 Performance index E0 Integrated performance-index  $E_0+E_1+E_2$  added The variable which makes this min is looked for making — and changing a variable. Parameter Pi which considered the condition of having granted the error If it attaches, tolerance spreads, since tolerance becomes large — manufacture — it becomes easy.

[Translation done.]

## \* NOTICES \*

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

## DESCRIPTION OF DRAWINGS

## [Brief Description of the Drawings]

- [Drawing 1] The approximate account Fig. of a lens design method.
- [Drawing 2] Drawing showing change of a wave front when a plane wave is changed into a spherical wave by the lens.
- [Drawing 3] Drawing explaining the inconsistency of the actual wave front from the wave front of an ideal being wave aberration.
- [Drawing 4] Drawing which explains that there may be little degradation even if the time when engine-performance change is large even when change of a variable is slight, and variable change are large although the engine performance is changed as a function of an optical-system variable.
- [Drawing 5] The graph explaining making the error of *Perilla frutescens* (L.) Britton var. *crispa* (Thunb.) Decne. into tolerance the reference value which has degradation although the engine performance of optical system decreases with a manufacture error being permitted.
- [Drawing 6] Performance index E0 which does not give an error according to a conventional method It is drawing explaining tolerance becoming small when an optical parameter is determined.
- [Drawing 7] the case where a parameter is chosen so that the integrated performance index which added the performance index in the condition of following the thought of this invention, giving an error to the parameter of shoes, and including an error to the performance index which does not include an error may be made into min — tolerance — breadth and manufacture — drawing explaining becoming easy.
- [Drawing 8] Performance index E0 in the condition of not granting an error Drawing explaining the procedure of a conventional method of asking for an optical parameter by making it min.
- [Drawing 9] The performance index E1 in the condition of having granted the DISENTA error of  $\Delta$ , and E2 Performance index E0 in the condition of not giving an error Drawing explaining the procedure of this invention of deciding a parameter by making the added integrated performance index and minimizing this.
- [Drawing 10] The graph explaining according to the conventional method of minimizing the performance index in the condition of not giving an error, and determining a parameter, the increment in aberration being remarkable and being unable to take large tolerance, even if manufacture errors are few. An axis of abscissa is a manufacture error and is expressing the error of various parameters collectively.
- [Drawing 11] It is the graph which according to the approach of this invention of minimizing the integrated performance index which added the performance index in the condition that there are no performance index and error in the condition of having given the error, and determining a parameter explains that the increments in aberration are few and large tolerance can be taken even if there are some manufacture errors. An axis of abscissa is a manufacture error and is expressing the error of various parameters collectively. Although an axis of ordinate is aberration, this can show the aberration adhering to the general engine performance, and can choose suitable aberration, such as gap, wave aberration, etc. of a location in ray tracing.
- [Drawing 12] Drawing explaining the flow of the design approach of this invention using the performance index about the condition which granted the error.
- [Drawing 13] Drawing showing the condition that the shaft of two lenses shifted. This is a DISENTA error.
- [Drawing 14] (1) is drawing showing the condition that one lens optical axis inclined between two lenses. It is a tilt error. (2) is drawing showing the condition of the thickness of a lens not being uniform and changing to the wedge action die. This is a wedge.
- [Drawing 15] The graph which shows distortion of a cylindrical field. A continuous line shows the lens curved surface of an ideal, and shows the lens curved surface where a broken line is actual. Since it is a curved surface, it has two-dimensional breadth. Here, xz cross section and yz cross section are shown. Although it is in the direction of y as an ideal curved surface, have shifted from the ideal curved surface, it is said in the x directions that it is, and appearance is shown.
- [Drawing 16] The interference fringe by the helium-Ne laser (wavelength of  $\lambda = 0.633$  micrometers) of the lens which has a gap of a curved surface in the x directions like drawing 15 is shown.
- [Drawing 17] Drawing showing that parallel light is converged on one point in the aspheric lens whose 1st page is a convex (aspheric surface), and whose 2nd page is a concave surface (spherical surface).
- [Drawing 18] Drawing showing signs that the light which carried out incidence to the lens by whenever [ incident angle / of 0 times, 8 times, and 16 degrees ] in the f-theta lens is converged on the image surface in a location different, respectively.
- [Drawing 19] Drawing showing the example which takes 18 beams of light in an entrance pupil in the example of a f-theta lens.
- [Drawing 20] The condition S0 of not giving an error according to a conventional method Performance index E0 Drawing showing the intensity distribution of the condensing spot on the image surface with a contour line about whenever [ each incident angle (0-degree, 8 degree, and 16 degrees) ] when a 160-micrometer DISENTA error is given to the f-theta lens determined with the optical parameter called for by making it min.
- [Drawing 21] The performance index E1 of the error condition which gave the DISENTA error according to this invention, E2 The condition S0 of not giving an error Performance index E0 When a 160-micrometer DISENTA error is added to the f-theta lens determined with the optical parameter called for by making the added integrated performance index E into min Drawing showing the intensity distribution of the condensing spot on the image surface with a contour line about whenever [ each incident angle (0 degree, 8 degree, and 16 degrees) ].

---

[Translation done.]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-316338

(43) 公開日 平成11年(1999)11月16日

(51) Int.Cl.<sup>6</sup>

識別記号

F I

G 0 2 B 13/00

G 0 2 B 13/00

G 0 6 F 17/50

G 0 6 F 15/60

6 8 0 A

審査請求 有 請求項の数 1 O L (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願平11-44161

(22) 出願日 平成11年(1999) 2 月 23 日

(31) 優先権主張番号 特願平10-69480

(32) 優先日 平10(1998) 3 月 3 日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000002130

住友電気工業株式会社

大阪府大阪市中央区北浜四丁目 5 番 33 号

(72) 発明者 布施 敬司

大阪府大阪市此花区島屋一丁目 1 番 3 号住

友電気工業株式会社大阪製作所内

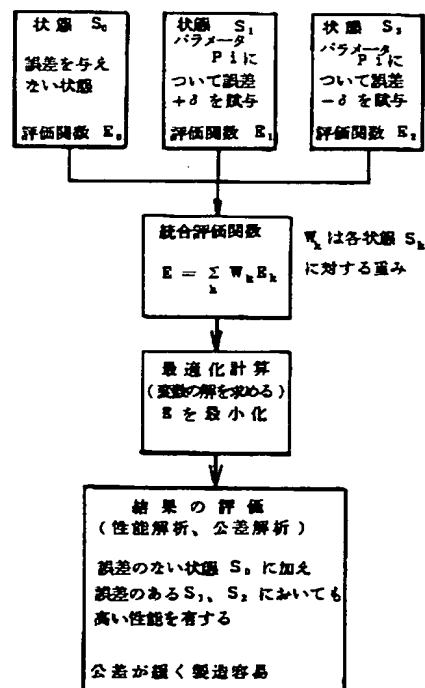
(74) 代理人 弁理士 川瀬 茂樹

(54) 【発明の名称】 レンズ及び光学系の設計方法

(57) 【要約】

【課題】 光学系の変数を決定する際、各点での収差や誤差の 2 乗の和である評価関数を最小にする値として決定される。しかし公差が考慮されておらず製造困難な変数値を選んでしまう事がある。はじめから公差を十分に大きくできる変数決定の方法を与える。

【解決手段】 光学変数のうちとくに製造誤差が大きくなる変数について  $\pm \delta$  の誤差をはじめから賦与した誤差状態を考え、誤差状態の評価関数と、誤差のない評価関数を足し合わせた統合評価関数をつくり、これを最小にするような変数を求める。誤差を賦与した変数については公差が大きくなる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光学系を決定する全ての光学パラメータに関し誤差の無い状態  $S_0$  のパラメータ組に対する評価関数  $E_0$  と、少なくとも一つの光学パラメータに誤差  $\pm \delta$  の誤差がある状態  $S_1$ 、 $S_2$  …に対する評価関数  $E_1$ 、 $E_2$  …を適当な重みを掛けて加えた評価関数  $E = w_0 E_0 + w_1 E_1 + w_2 E_2 \dots = \sum w_k E_k$  を作り、これを最小にするような光学パラメータの組を求めることを特徴とするレンズ及び光学系の設計方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は製造容易なレンズや光学系の設計方法に関する。レンズ系などの設計をする際、光学方程式をたててこれを何らかの手段によって解いてレンズ系を決定する全ての光学パラメータの値を求める。これが適当な解であるかどうかを評価する必要がある。評価のために評価関数というものを使う。これは、光線を追跡して像点での位置誤差や波面収差など各点におけるなんらかの誤差の二乗の和である。これが小さい程全体としての誤差が小さい。であるから評価関数を最小にするパラメータを求めてこれを設計値とするのである。設計値の良否を評価できる関数であるから評価関数という。評価関数を最小にする設計値は最も優れた性能を与えるはずである。

【0002】しかし実際には製造誤差がある。誤差のため設計値通りには作れない。そこで最低これだけの性能を与えるには誤差はこれ以下でないといけないという最大誤差の範囲を決める。誤差の許容範囲である。これが公差 (TOLERANCE) である。設計値通り製造できた時の性能がいくら優れていても、公差が小さいと製造が難しい。設計性能も優れ公差が大きいというパラメータの組を見つけることが重要である。本発明は公差のより大きい製造容易な光学系の設計方法を与えることを目的とする。

【0003】用語について述べる。レンズや光学系を定義するパラメータには様々なものがあるが、設計する上で、本発明ではその扱われ方に2つの側面があることを説明する。一つの側面は、所望の特性を有するレンズや光学系を設計する上で最適化の計算処理上で変数として扱われるパラメータと、定数として扱われるパラメータがある事である。複数のレンズにより構成される光学系を考える場合、各レンズの厚み、各面の曲率半径、各レンズ間の間隔などのパラメータは、目的の性能を満足するように最適の値を求める計算処理が行われる。このとき変数とはならない他の定数のパラメータは、既定の値のままで一定の値を保つ。例えば、光源からレンズまでの距離、ウインドウの厚みや曲率 (= 0)、或いは一部のレンズの形状、レンズ間距離が既定値に固定されるなどの場合、それらは定数として扱われる。レンズの材質により決まる屈折率、分散などの物性値やレンズの枚数

は、通常は最適化の計算中に変数として値を変化させることはできないので、変数ではなく定数である (計算処理の前提条件として扱われる。前提条件の変更として材質や枚数を変える事は可能である)。

【0004】もう一つの側面は、後に述べる様に、賦与誤差を与えるパラメータと、そうでないパラメータである。賦与誤差という言葉は本発明の根本思想であって後にその意味を述べる。公知の概念ではない。全く新規な概念である。しかしここでパラメータの種類について述べておくとのちのち便利であるので賦与誤差によるパラメータの区分についても予め説明する。全てのパラメータは、設計後にそれを製造するとき大なり小なり必ず製造誤差を持つ事になる。レンズの厚み、曲率半径、レンズ間隔などの変数となるパラメータは上記のように最適値が求められたとしても、実際に製造される場合には、厚み誤差、曲率半径誤差、レンズ間隔誤差を持つことになる。一方、定数として扱われるパラメータも同様に誤差を持つ。レンズのウェッジ (楔角)、ディセンタ (軸ズレ、偏心)、ティルト (傾き)、面精度 (面の歪み)、屈折率の不均一性などは、純粋に製造誤差を表すパラメータであり、一般には設計上は完全にゼロであることが前提となるパラメータである。本発明では、これら全てのパラメータの中から製造誤差が大きく光学性能を左右するパラメータを選び出して、そのパラメータに積極的に賦与誤差を与えて最適化処理を行う。賦与誤差を与えるパラメータは設計上変数として扱われるパラメータであっても、そうでなくても良い。また、ウェッジ、ディセンタなどのような元々誤差を表すパラメータであってもよい。賦与誤差を与えられたパラメータは通常3つの値を持つことになる。あるパラメータの値  $P$  に賦与誤差  $\pm \delta$  を与えたとすれば、そのパラメータは中心値  $P$  とともに、最大値  $P + \delta$  と最小値  $P - \delta$  の3つの値を持つ。このパラメータが定数であっても変数であっても、賦与誤差の与え方に違いはない。最適化計算中に変数の値が変化すれば、その新たな値を基準に賦与誤差が与えられる。例えば、あるレンズの厚みが変数であって、それに  $\pm 0.5 \text{ mm}$  の賦与誤差を与える場合、最適化計算処理の途中でその厚みの値が  $10 \text{ mm}$  であったとすれば、その厚みは中心値  $10 \text{ mm}$  と最大値  $10 \text{ mm} + 0.5 \text{ mm} = 10.5 \text{ mm}$  と、最小値  $10 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm} = 9.5 \text{ mm}$  の3つの値を有するとして扱われる。計算処理が進んで厚みの値が  $11 \text{ mm}$  に変わったとしても、同じ  $\pm 0.5 \text{ mm}$  の賦与誤差が与えられて、その時点で  $11 \text{ mm}$ 、 $11.5 \text{ mm}$ 、 $10.5 \text{ mm}$  の3つの値を有しているとして扱われる。以上の意味で、本発明ではパラメータを4つに分類することができる。

1. 変数であり、賦与誤差を与えるパラメータ。
2. 定数であり、賦与誤差を与えるパラメータ。
3. 変数であり、賦与誤差を与えないパラメータ。
4. 定数であり、賦与誤差を与えないパラメータ。



## 【0005】

【従来の技術】図1によって光学系の設計方法の概略を説明する。レンズ系よりなる光学系を設計するには、レンズの材料（屈折率、分散、吸収係数）、レンズの枚数、球面、非球面などの形状選定、レンズの相対的な配置（レンズ間距離、レンズ像面距離）等のパラメータについて初期値を決定しなければならない。またそれらのパラメータの中で何を変数として解を求めるかを決定する。これが基本構成の設定である。その他に光源の波長、レンズの厚み、材料、全体の寸法などいくつかの拘束条件がある。これらの拘束条件を考慮し、レンズ面での屈折を与える式を立て所望の出力を与えるような条件を課してレンズの厚み、曲率、非球面係数、間隔などの変数の解を計算により求める。即ち方程式を解いた変数の値が解であり、解の集合によって光学系を定義できる。

【0006】しかし多くの場合所定の目的を与える方程式は抽象的で一意的に解を与えることはできない。拘束条件があっても式の数足らず、解は幾つもある。また方程式自体が非線形であるし、非球面レンズを使う場合はレンズ自体を決める変数も多いのでこれらの式を解析的に解く事ができないのが殆どである。その場合は様々の近似式が使われたり光線解析がなされたりして光学系の変数について解を求める。近似解も幾つも有り得る。レンズ、ミラーによる所望の屈折や反射を与える式を満足する解はしばしば無数にあり、一つの解が直ちに適当なパラメータを与えるということは殆どない。多数の解が求まるがこれからもっとも適当な解の組を見つける必要がある。

【0007】解が適当かどうかを判断するための関数として評価関数というものを考える。これは一般に誤差の二乗を加えたものである。誤差が小さい方が一般には高性能であるからこれによって製品の性能を評価することができる。さらに評価関数を最小にするという条件によって変数を求めることもできる。この発明で評価関数というのは像面のいくつかの点での光学的誤差（収差）の二乗を適当な重みを付けて足し合わせたものである。もちろん収差の種類はいくつもある。そのうち適当な種類の光学誤差（収差）を採用して評価関数を定義する。レンズを含む光学系評価関数は例えば波面収差を評価関数の誤差として採用する。あるいは像面の試験点における光線のズレ（光線収差）を誤差として用いる事もある。評価関数の誤差は適当なものを随時採用する。

【0008】図2は平面波がレンズによって収斂して一点に結像する図を示す。平面波では波面は平面であるが、レンズによって絞られると波面は球面になる。しかし実際には厳密な球面波にならないこともある。図3にそれを示す。理想的な波面と実際の波面は食い違う。この違いが波面収差である。波面収差のために結像点で像が真円からずれる。またスポット径が理想的な場合から

外れてくる。真円度の食い違いも誤差の一種である。スポット径の違いも誤差である。だからこれらの誤差を評価関数の誤差として採用する事もできる。

【0009】先ほど求めた解により発生する収差を求め、評価関数を作り、評価関数の値を求める。その値が解の妥当性を評価している。いくつかの解に対して評価関数の値が求められる。そのうち評価関数を最小にする解の組を最適設計値とする。これを最適化計算と呼ぶ。例えば、収差係数  $s_j$  というものを想定し、その目標値を  $s_{j0}$ 、重みを  $w_j$  として、評価関数  $\Phi$  を  $\Phi = \sum w_j (s_j - s_{j0})^2$  とすることがある。収差の2乗誤差として評価関数を定義してこれを最小化する。このように光学方程式から解を求めて評価関数に入れて解を評価するというのが本来の評価関数である。

【0010】しかし光学方程式から解を求めることなくはじめから評価関数によって解を求めることもある。光学系変数（屈折率、厚み、曲率、非球面係数など）のある初期値を与えこれの評価関数を求め、初期値から変数に僅かな変化を与えてその評価関数を求めて、評価関数が減少する方向に変数の変化を与えて行くという漸近的方法もある。光学変数の具体的な値を仮定すると、光線追跡できるし光線収差や波面収差が計算可能になる。初期値に対して、波面収差、光線収差などを計算しその結果から波面収差や光線収差などの誤差より構成させる評価関数を計算する。解くのではなくて解をはじめから仮定するので光線追跡が可能である。そして初期値に僅かな偏奇を与えて同様に光線追跡して波面収差、光線収差などを求め評価関数を計算する。このように解を次々に仮定してその良否を評価関数によって評価する。

【0011】こうして評価関数を最小にする変数の組を求める。これが最適化計算である。つぎにこの値によって光線や波面の収差がどうなるか、スポットの形状は各点においてどうなるのか？ということシミュレーションする。最適の設計値が決まったので、パラメータを設計値からずらせて理想状態からの性能の低下を調べる。性能低下が許容できる範囲の最大誤差を公差として求める。これが公差解析である。ここまでの基本構成設定、最適化計算、シミュレーション、公差解析などが光学設計である。

【0012】そうして求められた結果に基づいて実際に光学系を作製する。そして実際に性能を調べる。これが試作評価である。実際の性能や、製造コスト、作り易さなどの観点で製品を評価する。評価関数による方法は性能だけを基準に値を選んでおりコストや作り易さ等は考慮されていない。だから試作評価は不可欠である。

【0013】試作評価によって満足のゆくものが得られない場合は、初めに戻って基本構成設定の段階からやり直す。同じ事を繰り返して最終的に最適の変数値（最適解）の組を求める。この段階までの同じような工程を繰り返すので、繰り返し回数が多いと、開発期間が長くな

る。開発費用が増大していく。好ましい事ではない。より速く最適の変数を求めたいものである。

#### 【0014】

【発明が解決しようとする課題】 レンズ系の性能の評価は、収差だけでなく、コストや製作性も考慮にいれなければならない。従来の評価法では、最適と計算された変数であっても、かならずしも製作容易とは限らない。求められたレンズの変数はそれが実現されておれば最適の性能のものを与えるはずである。これを設計性能と呼ぶ。しかし実際には変数とパラメータには製造誤差があるから計算通りのものができる。製造誤差の為に、実際の性能は、設計性能より低い。

【0015】 ここで性能という言葉进行を定義する。光学系には様々の特性があるが個々の特性の集合として、性能という言葉を使う。個々の特性は計量可能であるが、性能はその集合であるので、当然には計量可能でない。特性のうちどれを重視しどれを軽視するのかが決まらなと性能は計量できないわけである。特性の重みは適当に決められるのでここでは集合特性としての性能は計量可能と考えることができる。それでここでは性能を計量可能な統合的な変数とする。

【0016】 個々の特性は、光学系のパラメータ、変数によって決まる。レンズの厚み、表面裏面の曲率、曲面の係数、レンズ間の距離など変数となるものの数は多い。設計というのは、所定の目的の為此らの変数の最適値を決める事である。方程式を満たす変数のことをここでは単に「解」とよぶ。個々の変数について一つの解があり、解の集合が与えられると、設計がなされたということである。

【0017】 光学系には所定の目的があってこれを達成するような変数について方程式を立て方程式を解くことによって変数の解が求まるのである。ところがしばしば変数の数よりも方程式の数が少ないので方程式を満足する解の組は幾つもある。つまり拘束条件が少ないので、幾つもの解集合がある。であるから一組の解を求めるだけでは設計は終わらない。無限にあるかもしれない解の集合からさらに最適の組を見いださなければならない。これは所定の効果を与える方程式だけでは決まらない。むしろ個々の光学方程式とは無関係に別個の観点から最適値の組を決める事が多い。

【0018】 そのための手段が評価関数である。光線収差や光路差などの光学的誤差の二乗を各点において総和を取ったものであるが、これが小さいと言う事は性能が優れているという事である。現在の評価関数は収差の評価に重点が置かれている。つまり変数の適値が分かったとしてそれらのうち収差を最小にする解を評価関数によって決める。収差はその光学系が所定の目的を完全に達成した場合性能からの実際の性能のズレであるから収差によって、解を評価するのはいかさまもともである。つまり性能を評価して最高の性能を与える解を、無数の

解からただ一つ卓越したものとして選んでいるので、それは直接的な評価法である。

【0019】 しかしそれは製造容易さという観点から評価されたものではない。最適値の組によって与えられるレンズの形状を実際に作ることができればそれだけの優れた性能が得られるとしても、部品の製造には製造誤差が必ずあるから、製造誤差のために性能が低下する。あるパラメータの製造誤差が致命的であって僅かな製造誤差であるのに性能が著しく低下してしまう、ということがしばしばある。そうするとそのパラメータについては製造誤差をことさら少なくするように注意を払わなくてはならない。注意しても製造誤差はあるので、検査して許容できる誤差範囲にない製品は不合格とする必要がある。すると歩留まりが低く高コストになる。

【0020】 図4は横軸に光学系変数、縦軸下向きに性能を取ったグラフである。性能を決める光学変数は幾つもあるが簡単のために一つだけとしている。性能も抽象的なものであるが計量可能としている。評価関数を使って最適解を求める場合、例えば口点を初期値とすると、評価関数を下げる右方向に変数を偏奇させると八点に至る。これが評価関数の極小を与えるので最適解だということになる。しかし二点を初期値とすれば変数を少しづつ変えて評価関数を最小にするホ点に至る。これが最適解ということである。チ点を初期値とすると、変数を少しづつ変更してト点に至る。これが最適解ということになる。このように変数の数が多くて拘束条件や屈折条件が少ないので評価関数最小によって求める最適解が幾つもある。しかも最適解は初期値に依存する。すると初期値の選択が重要だということになる。しかし最適の初期値を知る方法はない。

【0021】 もう一つの問題は、最適値の間での優劣を決めるのは性能だけでないということである。性能から言えばホ点がト点より優れている。しかしホ点は極めて狭い谷になっている。ホ点に決めると僅かな製造誤差があっても性能の低下は著しい。ト点は性能はホ点より劣る。しかし広い谷の中にあるからト点に設計値を決めた場合かなりの製造誤差があっても性能が低下しない。さらに初期値が口にある場合は評価関数を下げて到達した最適値は八点になる。八点での製造誤差－性能関係はいっそう緩やかである。実際に光学系を製造する場合何らかの製造誤差がつきものであるから、ホ点を設計値とすると公差が小さいので、なかなか所望の性能のものを作る事は難しい。これに反してト点を設計値とすると多少の製造誤差があっても性能の低下があまりないので製造容易である。ホ点は許容誤差つまり公差が小さいので製造困難である。ト点や八点は公差が大きいのて製造容易である。製造容易と言う観点からいえば性能が最も優れているホ点よりも公差が広いト点や八点を設計値とする方がよい。

【0022】 どのような最適値に至るか？ということとは

初期値による。しかし初期値だけによるのではなく初期値からどのように変数を動かすかという順序にも依存する。変数を変化させる順序が違えば異なる極小点にいたる。初期値の選択には任意性があり変数変化の順序も多様な自由度がある。評価関数最小ということだけでは公差の広い解に至る事はできない。性能が優れた解に至ったとしても公差が狭いと製造困難である。

【0023】図5に製造誤差と性能の関係を抽象的に示す。最適値 $x_0$ のときに、最大の性能（設計性能） $\mu$ が得られる。最適値から製造誤差があると性能が下降する。許される最低の性能（基準値性能）が $\mu_0$ だとする。性能曲線を基準値が横切る点 $\mu_0$ での誤差を公差 $\pm \Delta$ とする。つまり許容される性能降下分に対応する製造誤差 $e$ が公差 $\pm \Delta$ ということになる。性能に影響するパラメータ、変数はたくさんあるので、あるパラメータの公差は大きく、あるパラメータについては小さいという事がある。最適値 $x_0$ からのズレ $e = (x - x_0)$ に対して、性能が急降下する場合もある。そのようなパラメータが存在する場合、そのパラメータについての加工は細心の注意を要求するし注意しても不良品が大量に出る。つまり歩留まりが悪く製造が難しい。

【0024】単位製造誤差に対する性能降下 $dS/d e$ というようなものを抽象的に想定するとはなしが分かりやすくなる。これが大きいパラメータを含む光学系は、理想的な値のものができない限り性能は著しく落ちるので実際には好ましくない。収差によって解の評価を行うだけでは、製造誤差の影響は分からない。そこで最適解が決まった後で、それぞれのパラメータの許容誤差つまり公差が与えられる。同じように厚さが10mmのレンズであったとしても、公差が100 $\mu$ mの場合と、公差が3 $\mu$ mの場合ではその製造の難易度が全然違う。

【0025】最適解があってそれぞれのパラメータの公差の組があり、そのうちとくに小さい公差があったりすると、その最適解にのっとった製品は製造が困難である。このような製造の難易によって解の評価をするというような視点は従来の光学設計評価にはなかったものである。従来の評価法は実際に製造し易い解を最適解とせず、収差の小さい性能の高い解を最適解としている。

【0026】本発明は従来の設計方法に用いる評価関数と違って、それによって製作容易かどうかをも知る事ができ、結果として実際の製作が容易なレンズ系、光学系のパラメータを求めることを可能にする設計方法を与える。

【0027】

【課題を解決するための手段】全てのパラメータに誤差の無い状態 $S_0$ のパラメータ組に対する評価関数 $E_0$ と、少なくとも一つのパラメータに誤差 $\pm \delta$ の誤差がある状態 $S_1$ 、 $S_2$ …のパラメータ組に対する評価関数 $E_1$ 、 $E_2$ …を適当な重みを掛けて加えた評価関数 $E = w_0 E_0 + w_1 E_1 + w_2 E_2 \dots = \sum w_k E_k$ を作り、

これを最小にするようなパラメータの組を求めるのが本発明の光学系設計方法である。誤差を与えるパラメータは高精度で製作するのが難しいパラメータを選ぶのが良い。さらに誤差状態に与える賦与誤差 $\pm \delta$ は、通常の製造誤差よりも大きい値にするのが良い。

【0028】製造の過程で自然に現れる製造誤差ではなくて、本発明はパラメータに積極的に想定される誤差を賦与した状態 $S_1$ 、 $S_2$ …を考える。この誤差は前者の製造誤差と区別する為に賦与誤差と仮に呼ぶことにする。また複数の賦与誤差を含む状態を誤差状態 $S_1$ …と呼ぶ。誤差を与えない状態 $S_0$ を無誤差状態と呼ぶ。評価関数の重み付きの和 $\sum w_k E_k$ を統合評価関数と呼ぶことにする。

【0029】図12によって本発明の概略の思想を説明する。状態 $S_0$ は賦与誤差を与えない理想的な状態である（無誤差状態）。その評価関数を $E_0$ とする。これの他にパラメータ $P_i$ に誤差 $+\delta$ を与えた状態が $S_1$ （誤差状態）である。この評価関数を $E_1$ とする。状態 $S_2$ は同じパラメータ $P_i$ に $-\delta$ の誤差を与えた状態である。この評価関数を $E_2$ とする。パラメータ $P_i$ が変数として扱われるならば、これら3つの状態においてパラメータ $P_i$ は $P_i$ 、 $P_i \pm \delta$ となって異なるが、そのほかのパラメータは共通にして変化させる。二つ以上のパラメータについて誤差を賦与するようにしても良い。その場合は $S_3$ 、 $S_4$ …など多くの状態と評価関数 $E_3$ 、 $E_4$ …ができる。全ての変数の値を決めて波面収差或いは光線収差などをもとめ統合評価関数 $E = \sum w_k E_k$ の値を計算し、 $E$ が最小になるような変数の組をもとめる。これが最適化計算である。適当な変数の組を初期値としてあたえ、収差を求めて、 $E$ を計算し、変数を微小変化させて、 $E$ を最小にする変数を決める。

【0030】光学変数が求められると結果を評価する。これが性能解析と公差解析である。本発明は誤差を賦与した状態 $S_1$ 、 $S_2$ …の評価関数を加えた統合評価関数を最小にするように変数を最適化するから、賦与誤差を与えたパラメータについて公差が大きくなる。公差が大きいのので製造が容易になる。生産性が上がり製造コストも低減することができる。

【0031】

【発明の実施の形態】本発明は光学パラメータのいくつかについてわざと誤差を賦与した状態を想定しその評価関数を、誤差のない評価関数に加えて統合評価関数をつくりそれを最小化する変数を求めることによって光学系を設計する。それによって公差を広げる事ができ製造容易になる。

【0032】（1）賦与誤差を賦与するパラメータというのは例えばつぎのようなパラメータである。

- ・各面の曲率半径
- ・非球面の係数
- ・面精度（面の歪み）

- ・中心厚
- ・レンズ間隔
- ・屈折率
- ・屈折率不均一性
- ・ウェッジ
- ・ティルト
- ・ディセンタ

等である。光学要素がレンズだけでなくミラーやその他の素子をも含む場合はそれらの光学パラメータも考慮に入れる。これらのパラメータから一つ或いは複数個を選択して誤差を賦与した状態を想定する。特に製作精度が厳しく要求されるパラメータを選べば良い。

【0033】(2) 賦与すべき誤差 $\delta$ は、製作精度を考慮の上、適当な値が設定される。通常の製作誤差以上の値とするのが望ましい。製作誤差と言うのは製造する時に偶然に発生する実際の誤差のことであり確率変数であるがここではその平均値或いは統計的にある確率で発生し得る誤差の値(2 $\sigma$ 値など)という意味である。賦与誤差 $\delta$ が小さい状態を $S_1$ 、 $S_2$ …にするとその状態に引っ張られてその状態について評価関数が小さい変数を選んでしまうので公差はあまり広がらない。ところが賦与誤差 $\delta$ が大きすぎると、 $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ …の状態間の相違が大きくなりすぎるので統合評価関数の値が下らない。適当な賦与誤差 $\delta$ を選ぶ必要がある。

【0034】(3) 全てのパラメータに初期値を与える。これは光学方程式を満足する値というのではなく光学式をある程度満足させる値に近いといった程度のものであってよい。初期値によってそれから到達できる最適値が左右される。初期値から評価関数が減少する方向に少しづつ変数の値を変えて評価関数を最小にする変数を求める。

【0035】最適化によって、評価関数 $E$ が十分に小さくならない場合は、未だ性能が不十分であるか、或いは製造誤差の影響が強くて公差が小さすぎるということを意味する。これは統合評価関数の内訳を見ることにより判別できる。 $w_k E_k / E$  ( $k=0, 1, 2, \dots$ ) を各状態 $S_k$ について計算すれば、各状態に関する評価関数が全体の統合評価関数に対しどの程度寄与しているか

(寄与度)を求めることができる。 $w_0 E_0$ の寄与度がまだ大きければ性能不十分である。 $w_0 E_0$ の寄与度が低ければ公差が小さいことを意味する。どの状態の寄与度が高いかによって、公差が緩くなっていないパラメータを見つけられる。このように評価関数 $E$ が小さくならない場合は初期設定が悪いわけである。初期設定を見直して新たな初期値から評価関数を下げる方向に変数を変えて評価関数の繰返し計算を再び行う。

【0036】初期値の変更によっても評価関数が十分に小さくならない場合は、賦与誤差 $\delta$ をすこし小さくして初期設定し評価関数を減らす方向に変数を変えながら最小化する。最終的に公差が緩くならない場合もあり得

る。本発明によって、どんな場合でも思いのままに公差を緩められるわけではない。(本発明によって、光学理論、すなわち自然現象としての光学現象がくつがえされるわけではない。)より性能の高いレンズ、光学系を望むならば大なり小なり公差は厳しくなる。本発明は所望の性能を満足する範囲で、できるだけ公差が緩く、製造容易な解を効率的に見つけ出す方法として有効に働く。

(4) 誤差状態 $S_k$ が多い場合( $k$ の総数 $K$ は $P_i$ の $i$ の総数 $I$ の2倍: $K=2I$ )つまり $P_i$ を多数選択した場合は、評価関数が複雑になる。最適化の計算が長くなり時間もかかる。それが困るというのであれば、公差解析の結果を見て、製作上問題となるパラメータに限定して誤差を賦与するようにする。そうすると誤差状態の数 $K$ を減らし計算時間を短縮できる。つまり製造誤差を小さくするのが難しく要求される公差以下にできないようなパラメータを選ぶということである。

【0037】これまで述べてきたものは賦与誤差ひとつについて二つの誤差状態を与えた。誤差状態 $S_k$ の数を減らし、しかも公差を広げるためには、つぎのような手段をとることもできる。一つの誤差状態に二つの異なる賦与誤差を含ませる方法である。例えばパラメータ $P_i$ とパラメータ $P_j$ を選び、誤差状態 $S_1$ は $P_i$ について $+\delta_i$ 、 $P_j$ について $+\delta_j$ とし、誤差状態 $S_2$ は $P_i$ について $-\delta_i$ 、 $P_j$ について $-\delta_j$ とすることができ、 $S_1 (+\delta_i, +\delta_j)$ 、 $S_2 (-\delta_i, -\delta_j)$ とするのである。こうすると賦与誤差の種類は2つあり誤差状態も二つである。つまり $(+\delta_i, -\delta_j)$ と $(-\delta_i, +\delta_j)$ の状態を省いている。こうすると誤差状態の数を半分に減らせるので計算時間を短くできる。ただし、各誤差の影響が打ち消し合うことのないように、誤差を与えるパラメータの組み合わせを選択し、賦与誤差の符号選択を行う必要がある。例えば、あるレンズの厚みと他のレンズの厚みの両者の誤差を一つの状態に賦与した場合、各誤差の影響が相殺しあって、その状態に対する評価関数があまり大きな値を持たず、最適化してもあまり公差を広げられないことがある。あるいは、曲率半径と厚み、屈折率と曲率半径などでも同様のことが起こり得る。このような場合、賦与誤差の符号(+か-)の組み合わせを変えて、各誤差の影響が相殺されず強め合うように選択することが必要である。または、曲率半径、厚み、屈折率などの軸対称な誤差と、ディセンタ、ティルト、ウェッジのような軸対称でない誤差を組み合わせてもよい。

【0038】(5) 公差解析の判定指標は、像面における各点での何らかの収差や光路差或いは性能である。

①波面収差、②光線収差、③MTF値、④歪曲収差、⑤ $f-\theta$ 線形性、⑥焦点距離

などである。⑤は $f-\theta$ レンズだけに使える特殊な性能である。波面収差(①)の場合は誤差増大による波面収差の増大が例えば $\lambda/100$ 以下( $\lambda$ は波長)であるよ

うにする。その他の②～⑥に関しても適当な限界の値を決める。その限界値を与えるパラメータの設定値（設計値）からのズレ（誤差）が公差である。

【0039】図6は従来法による評価関数最小化による設計法を示す。横軸があるパラメータに関する製造誤差であり縦軸が性能である。初期値では性能は低い。これから評価関数がより小さくなるように変数を変更して行く。初期値から上向きに○が書いてあるがこれが漸近的に改善された状態である。対象のパラメータが変数として扱われ値が変化する場合には、図4に示すように変数の基準値自体が変動して性能が上昇してゆく。図4の二からホの変化のようなものを図6の初期値から最適解ヨまでの○の推移によって表現している。最適解はE<sub>0</sub>を最小にする変数の組である。これはある初期値から始めて変数を変えた時に最高の性能を与えるものである。ところが公差が小さく、ヨタ間でのみ基準性能を与えるが、タからはずれると性能が顕著に低下してしまう。

【0040】図7は本発明の方法による統合評価関数最小化による設計方法を示す。初期値は任意に選ぶ。初期値から統合評価関数を減らすように変数を変動させてゆく。最小の値を与えるのが最適値レである。誤差状態を含む統合評価関数を扱うので、公差フが広がる。広くレフ間に製造誤差があっても満足できる性能を与えることができる。

【0041】光学系を決定するパラメータは幾つもある。そのうちP<sub>j</sub>のパラメータだけに誤差±δを与える。+δの誤差を与えた状態S<sub>1</sub>の評価関数E<sub>1</sub>が統合評価関数に含まれる。統合評価関数を最小化するときE<sub>1</sub>も当然に小さくなるべきである。E<sub>1</sub>が小さいということは誤差+δがあっても性能低下が少ないような変数の組を選んでいるということである。だからパラメータP<sub>j</sub>の公差が広がる。直観的にはそういうことである。しかしこれは厳密な証明はできない。パラメータは様々であって光学方程式への関与の程度も多様であるからである。それ以外のパラメータについては公差が広がるか狭くなるかは予め分からない。それは実際に計算してみないと分からない事である。それ以外のパラメータの公差は大きくなるものもあれば小さくなるものもあり、あまり変わらないものもある。大きくなる、あるいはあまり変わらない他のパラメータは全く問題ない。また、元々大きな公差であった他のパラメータが多少小さくなくても製造上の問題は生じない。問題となるのは、

$$Z = \frac{c r^2}{1 + \{1 - (1+k) c^2 r^2\}^{1/2}} + \sum \alpha_j r^{2j} \quad (1)$$

【0046】というように円錐定数（conic constant）kと半径rの偶数次のべきの係数α<sub>j</sub>である。cは頂点曲率（Vertex curvature）である。例えばrの4次、6次、8次、10次というようにとるとαは4つのパラメータとなる。像面位置は第2レンズからの像面の距離である。このように変数の数が多いので評価関数によって

他のパラメータの公差が小さくなり、製造精度がその公差を満足できなくなる場合であるが、仮に、他のパラメータの公差が厳しくなった場合には、そのパラメータにも誤差を賦与した状態を追加して新たに統合評価関数を作成し、再び最適化を行う事によって解決できる。

【0042】

【実施例】対象になる光学系はどのようなものであっても良い。ここでは例としてf-θレンズについて、様々のパラメータについてプラスマイナスの偏奇を与えて、評価関数を最小にするような最適解を求め、公差が大きくなるということを示す。

【0043】（A）初期レンズ設定

○レンズ枚数 2枚 材質 ZnSe（屈折率n=2.403）

第1レンズ 第1面は非球面、第2面は球面

第2レンズ 第1面は球面、第2面は非球面

○波長 10.6μm

○入射瞳位置 第1レンズ第1面より物界側50mm

○Fナンバー 6

○入射角 0°、8°、16°

f-θレンズというのは光軸からθをなす角度で入射した光線を像面の中心からfだけ離れた位置に結像するようなレンズである。図18に光学系を示す。レンズは2枚使われている。平行光をあるθの傾き角でレンズ1にいれると、レンズ2から出た光線は像面で中心からfθ離れた点に収束する。例えばθ=0°の平行光ケ、フ、コは光軸上のJ点に収束する。θ=8°の平行光テ、ア、サは像面で8×Lの位置K点に結像する。θ=16°の平行光メ、ミ、シは像面で16×Lの位置M点に結像する。ここでLは定数である。それぞれ3本の光線しか書いていないが実際には無数の平行光線が一点に収束している。

【0044】（B）変数設定

各面（4面ある）の曲率半径、厚み（間隔）、非球面係数、像面位置である。レンズが二つとするので、4つの曲率半径が変数として存在する。厚みについては二つのレンズの厚みと、レンズ間の距離がある。第1レンズの第1面と第2レンズの第2面は非球面としているからそれぞれについて非球面係数が変数となる。これは

【0045】

【数1】

変数の適否を判断する必要がある。

【0047】（C）拘束条件

焦点距離 127mm、

レンズ厚み 3.5mm以上15mm以下

【0048】（D）誤差の設定

1. ディセンタ……レンズ中心軸の光学軸からのずれ

2. ティルト……レンズの傾き
3. 各面の曲率半径…前面後面の球面の曲率半径
4. 非球面係数…ふたつの非球面の係数
5. 面精度 (面の歪み)
6. 屈折率…Z n S e レンズの全体的な屈折率の所定値からのずれ
7. 屈折率不均一性…局所的な屈折率の変動
8. ウエッジ

【0049】などである。誤差を賦与すべきパラメータは、これらから一つあるいは複数個選択される。例えばもしもディセンタだけに賦与誤差を与えるとするとつぎのようになる。つまりレンズズレの無い場合 ( $S_0$ ) の評価関数  $E_0$  と、 $\pm \delta$  のレンズの軸ズレの有る場合 ( $S_1$ ) ( $S_2$ ) を仮定してそれぞれの評価関数  $E_1$ 、 $E_2$  を変数の組毎に計算し評価関数の和を最小にする最適の変数群を求める。全体の評価関数  $E$  は重み  $w_0$ 、 $w_1$ 、 $w_2$  を掛けてこれの合計とする。

$$E = w_0 E_0 + w_1 E_1 + w_2 E_2 \quad (2)$$

である。重み  $w_0$ 、 $w_1$ 、 $w_2$  は自由に決めて良い。

【0050】ここでは  $w_0 = w_1 = w_2 = 1$  としている。だから、評価関数は単に

$$E = E_0 + E_1 + E_2 \quad (3)$$

である。賦与すべきディセンタ誤差  $\pm \delta$  は製作精度のレベルを考慮して適当な値を与える。賦与誤差は製造誤差よりも大きい値とする方がよい。

【0051】ディセンタ誤差の他にその他のパラメータに誤差を与えるようにしても良い。例えば1枚目レンズの第1面の曲率半径に  $\pm 1\%$  の誤差を与える。そうすると、 $S_3$ 、 $S_4$  という状態が増える。5つの評価関数の和ができるのでこれを最小にするような変数の組を求める。そのようにして最適変数の組が求められたとき、ディセンタ公差、曲率半径公差を求めると、 $S_0$  の時の公差よりも増えている。公差が大きいので製造が容易になる。

【0052】評価関数として、例えば光線収差を採用する。もちろん、波面収差など他の光学的誤差を評価関数に用いても良い。レンズに収差があると、理想的には像面上で1点に収斂される筈の光線群が、点々と散らばっ

$$E = \sum w_k E_k = \sum \sum \sum w_k w_f w_j (\Delta x_{kfj}^2 + \Delta y_{kfj}^2) \quad (5)$$

となる。これを最小化させるように変数を変動させるのである。

【0055】上記の評価関数では、レンズによる光の収斂特性については評価可能である。しかし  $f-\theta$  レンズの設計では、もう一つの重要な特性として  $f-\theta$  関係の直線性についても評価可能とする必要がある。(4) は像面での光線位置ズレを誤差としているから  $f-\theta$  直線性評価はこれには含まれない。 $f-\theta$  レンズの場合はさらに評価関数を工夫して良好な  $f-\theta$  の間の直線性を得るように最適化を図る必要がある。

【0056】例えば、0度、8度、16度の3つの入射

で像面に到達する。各光線のズレの二乗和をとり、それを評価関数としている。

【0053】図19は入射瞳 (entrance pupil) 上の光線の分布を示す例である。ここでは、入射瞳は、レンズに入射する光の断面と考えて良い。入射瞳の中の一点は、一本の光線を意味する。任意の瞳上の位置 ( $P_x$ 、 $P_y$ ) に好みの数の光線を取って良いが、計算の精度を上げるためには、光線の数多くて、瞳全体に広く分布させる方がよい。ここで ( $P_x$ 、 $P_y$ ) は瞳上の座標を示す。瞳の大きさは正規化してあり、半径1の円で表している。しかしながら、計算量を減らし最適化を迅速に実施するには、光線数があまり多すぎではない。図19に示すものは、18本の光線を取る例である。瞳の中心から放射状に伸びる6本の直線を取り (それぞれ0度、60度、120度、180度、240度、300度の方向)、さらに大きさの異なる3つの輪を取る。3つの輪の半径  $R$  はそれぞれ  $R = 0.3357$ 、 $0.7071$ 、 $0.9420$  である。これら6本の放射線と3つの輪の交点に計18本の光線を取る。各光線の重みは、黒丸が  $w_j = 0.048481$  (12本)、白黒丸が  $w_j = 0.07757$  (6本) とする。

【0054】各光線が像面でどのような位置にばらついて到達するかを計算すると、その位置ズレ  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  が求まる。 $\Delta x$ 、 $\Delta y$  は、全光線の重心位置からのズレの  $x$  成分と  $y$  成分である。各光線を  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, 18$ )、入射角度0度、8度、16度を  $f$  ( $f = 1, 2, 3$ ) によって示し、光線毎の重み  $w_j$  と入射角度毎の重み  $w_f$  を掛けて一つの状態  $S_k$  に対する評価関数  $E_k$  を得る (ここでは単一波長の場合を扱うので省略するが、複数の波長の光を扱う場合には、各波長にも重み  $w_\lambda$  を掛けて和を取る事になる)。  $S_k$  に対する  $E_k$  は  $E_k = \sum \sum w_f w_j (\Delta x_{kfj}^2 + \Delta y_{kfj}^2)$  (4) とする。これは各状態  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、…の評価関数  $E_0$ 、 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、…を与える。本発明は無誤差状態  $S_0$  と誤差を賦与した賦与誤差状態  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  の各評価関数を加えるので、各状態  $S_k$  の重みを  $w_k$  として、統合評価関数  $E$  は、

角度を取るときの像面での各焦点  $J$ 、 $K$ 、 $M$  の位置  $h_j$  ( $=0$ )、 $h_K$ 、 $h_M$  は、その時点での光学系のパラメータについて光線追跡することによって計算によって求められる。このとき、入射角度8度に対し16度は丁度2倍の角度と成っているので、理想的な  $f-\theta$  に直線性が成り立つのであれば、 $2h_K = h_M$  となるはずである。そこで、 $f-\theta$  の直線性を評価する関数として、 $E_L = (2h_K - h_M)^2$  (6)

を取る。入射角度を3つよりも多く設定し、式(6)のような関数を多数立てて、それらの総和を取れば、 $f-\theta$  の直線性を詳細に評価することもできる。式(5)と

同時に、式(6)のような評価関数も最小化するように変数の値を最適化する。

【0057】また、焦点距離、レンズの厚み範囲などの拘束条件についても、評価関数の中に組み込んで良い。焦点距離  $f$  を目的の値、例えば 127 mm とするため

$$e_2 = \alpha (t - 3.5)^2 + \beta (t - 15)^2 \quad (8)$$

を取る。但し係数  $\alpha$  は、 $t > 3.5$  mm のとき  $\alpha = 0$ 、 $t \leq 3.5$  mm のとき  $\alpha = 1$  の値を取るものとする。同じく係数  $\beta$  は  $t < 15$  mm のとき  $\beta = 0$ 、 $t \geq 15$  mm のとき  $\beta = 1$  の値を取るものとする。だからこれは厚み  $t$  が 3.5 mm ~ 15 mm では 0 となり、この範囲をはずれると正の値になる。このように拘束条件をも評価関数によって表現できる。このような拘束条件に関する評価関数  $e_c$  ( $e_1$ ,  $e_2$ , ...) をそれぞれ適当な重み  $w_c$

$$E = w_A \sum w_k E_k + w_L E_L + w_C E_C \quad (10)$$

となる。重み  $w_A$ 、 $w_L$ 、 $w_C$  は、 $\sum w_k E_k$ 、 $E_L$ 、 $E_C$  の各評価関数をバランス良く最小化させるように働く。ここでは単純に  $w_A = w_L = w_C = 1$  として

$$E = \sum w_k E_k + E_L + E_C \quad (11)$$

とする。この統合評価関数を最小化するように変数を最適化する計算を行う。最適解を求めることにより、各状態での光線収差に加え、 $f - \theta$  直線性、拘束条件のそれぞれについて、最も良好となるパラメータ値の組が求められる。

【0059】まず従来の方から見て  $S_0$  の場合の最適設計をする。評価関数は  $E = E_0 + E_L + E_C$  である。図8にこれを示す。光源から出た光はポリゴンミラーやガルバノメータミラーなどの偏向装置により偏向されて、それにより決まる入射角度でレンズに入射し、レンズによって絞られて像面に収束する。ここでは3つの偏向された光を例として示すが、この数は任意である。レンズの曲率、厚みなどが変数になる。レンズが2つ以上あればレンズ間隔も変数である。レンズの形状、寸法などに一定の制限条件が課されているのでその範囲で変数を様々に変化させる。これはディセンタも曲率半径なども誤差を与えずに、従来法に従って評価関数を計算する。評価関数が最小になる変数の(最適)値を求める。これから変数の公差を求めるものである。それによるとディセンタ公差は  $\pm 40 \mu\text{m}$  であった。第1レンズの曲率半径公差は  $\pm 0.066\%$  である。いずれの公差も小さいものであって製造困難である。

に、

$$e_1 = (f - 127)^2 \quad (7)$$

によって表される評価関数を取ることができる。レンズの厚み  $t$  を目的の範囲、例えば 3.5 mm 以上 15 mm 以下とするためには、評価関数として、

を掛けて足し合わせるにより、全ての拘束条件に関する評価関数  $E_c$  にまとめ、

$$E_c = \sum w_c e_c \quad (9)$$

となる。

【0058】以上に示したような、3つの評価関数(5)、(6)、(9)の総和を取って統合評価関数を完成させる。適当な重み  $w_A$ 、 $w_L$ 、 $w_C$  を掛けて総和を取る。統合評価関数  $E$  は

【0060】[実施例1 ( $\pm 160 \mu\text{m}$  のディセンタ)] ディセンタ誤差の無い  $S_0$  状態の他に2つの誤差付状態を考える。図9に説明図を示す。光学系の変数として、レンズの前面後面の曲率、レンズ厚、レンズ間隔などがある。ディセンタがない場合を左に示す。光源からの光線がレンズによって3つの位置に収束される。その評価関数を  $E_0$  とする。この場合は波面収差ではなくて光線収差を採用している。入射角度は例えば0度、8度、16度の方向である。

【0061】ディセンタ誤差  $\pm 160 \mu\text{m}$  を与えた状態を  $S_1$  ( $-160 \mu\text{m}$ )、 $S_2$  ( $+160 \mu\text{m}$ ) とする。これらについても光線収差を採用する。それぞれの状態の評価関数を  $E_0$ 、 $E_1$ 、 $E_2$  とする。それぞれの状態に対して光学変数を与える。形状、寸法などに制限条件が課されている。制限条件内で変数を変えて、統合評価関数  $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_L + E_C$  を計算し ( $w_k = 1$ ;  $k = 0, 1, 2$ ) これを最小にする変数の組を求めた。その場合のディセンタ公差は公差解析の結果  $\pm 202 \mu\text{m}$  であった。公差が約5倍に大きくなるので製造が容易になる。それだけでなく性能も向上する。

【0062】図20は従来法によって無誤差状態の評価関数を最小化して求めた光学パラメータによって決まる  $f - \theta$  レンズについて、特性をシミュレーションにより解析評価した結果の一例である。

【0063】

【表1】

従来例1のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm) | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率   |
|-------|-----|-----------|------------|-------|
| L1    | S1  | 表2        | 4.228      | 2.403 |
|       | S2  | -64.058   | 6.389      |       |
| L2    | S3  | -548.067  | 13.973     | 2.403 |
|       | S4  | 表2        | 162.722    |       |

【0064】

【表2】

従来例1の非球面データ

| 面番号 | 1/c<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -35.861     | -1.234 | -2.493E-6  | -2.517E-10 | 3.056E-13  | -1.154E-15 |
| S4  | -87.063     | -0.828 | 3.407E-7   | 3.776E-11  | -1.691E-14 | -3.797E-18 |

【0065】製造誤差としてディセンタ誤差 $160\mu\text{m}$ を賦与し、そのときの像面での集光スポットの強度分布を等高線で示したものである。これは図18のJ点、K点、M点、即ち入射角度が0度、8度、16度の場合について、点像強度分布関数(point spread function)を計算した結果である。図20で、集光スポットの強度は、中心が高く、外に広がるに従って低くなる、鋭い山の形を等高線で表示している。0度(J点)のスポットは殆ど真円に近い等高線になっている。それに対して、16度(M点)のスポットは、楕円形に長く歪んでいる。これは、設定したディセンタ誤差 $160\mu\text{m}$ によ

て、M点のように、入射角度が大きくなるにつれてスポットが歪んでしまい、良好な特性が得られない事を示している。

【0066】一方、図21は本発明によってディセンタ誤差 $\pm 160\mu\text{m}$ を賦与した誤差状態を設定した統合評価関数を取り、それを最小化して求めた光学パラメータによって決まる $f-\theta$ レンズについて、上記と同じようにディセンタ誤差 $160\mu\text{m}$ を設定し特性をシミュレーションした結果である。

【0067】

【表3】

実施例1のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表4           | 4.755         | 2.403 |
|       | S2  | -73.008      | 7.211         |       |
| L2    | S3  | -282.315     | 12.951        | 2.403 |
|       | S4  | 表4           | 163.241       |       |

【0068】

【表4】

実施例1の非球面データ

| 面番号 | 1/c<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -39.877     | -2.308 | -4.698E-8  | 3.492E-10  | -3.413E-13 | -7.573E-16 |
| S4  | -83.627     | -0.242 | 1.239E-7   | 4.338E-11  | 2.666E-15  | -4.085E-18 |

【0069】このレンズでは、ディセンタの公差が $\pm 202\mu\text{m}$ まで緩くなっているのに、 $160\mu\text{m}$ のディセンタ誤差があっても、入射角度0度、8度、16度のいずれのスポットも歪まず真円形の回転対称な等高線を描いている。図20の従来法と比較すると、本発明の優れている事が分かる。

【0070】[実施例2( $\pm 160\mu\text{m}$ のディセンタ誤差と $\pm 1\%$ の曲率半径誤差;その1)]ディセンタ誤差 $\pm 160\mu\text{m}$ に加えて、第1レンズの第1面の曲率半径に $\pm 1\%$ の誤差を賦与した。

【0071】

【表5】

実施例2のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表6           | 4.788         | 2.403 |
|       | S2  | -77.323      | 6.746         |       |
| L2    | S3  | -287.042     | 12.981        | 2.403 |
|       | S4  | 表6           | 163.698       |       |



【0072】

【表6】

実施例2の非球面データ

| 面番号 | 1/c<br>(mm) | k      | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | $\alpha_5$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -40.189     | 0.013  | -2.338E-7  | -3.330E-11 | 3.449E-13  | -7.662E-16 |
| S4  | -82.100     | -0.756 | -1.574E-7  | 1.876E-11  | -7.220E-16 | -5.573E-18 |

【0073】 $S_1$  ( $-160\mu\text{m}$ )、 $S_2$  ( $+160\mu\text{m}$ )、 $S_3$  ( $-1\%$ )、 $S_4$  ( $+1\%$ )と $S_0$ を加えた5つの状態について評価関数 $E=E_0+E_1+E_2+E_3+E_4+E_L+E_C$ を計算しこれを最小にする変数の組を求めた。この場合の第1レンズの第1面の曲率半径公差は $\pm 0.770\%$ となった。 $S_0$ の状態のみ扱う従来設計の公差の10倍以上に増えているからより製造容易になる。また、ディセンタの公差も $\pm 180\mu\text{m}$ とな

り、従来設計の $\pm 40\mu\text{m}$ よりも大きく緩和された。

【0074】【実施例3 ( $\pm 160\mu\text{m}$ のディセンタ誤差と $\pm 1\%$ の曲率半径誤差；その2)】ディセンタ誤差 $\pm 160\mu\text{m}$ と同時に第1レンズの第1面の曲率半径に $\pm 1\%$ の誤差を与えた。

【0075】

【表7】

実施例3のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表8           | 5.117         | 2.403 |
|       | S2  | -73.884      | 8.788         |       |
| L2    | S3  | -282.989     | 12.896        | 2.403 |
|       | S4  | 表8           | 183.186       |       |

【0076】

【表8】

実施例3の非球面データ

| 面番号 | 1/c<br>(mm) | k      | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | $\alpha_5$ |
|-----|-------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -42.181     | -0.004 | -1.784E-7  | -5.900E-10 | 1.521E-12  | -1.947E-15 |
| S4  | -67.600     | -0.596 | -5.942E-8  | -2.302E-11 | 3.611E-14  | -1.850E-17 |

【0077】 $S_1$  ( $-160\mu\text{m}$ 、 $-1\%$ )、 $S_2$  ( $+160\mu\text{m}$ 、 $+1\%$ )と $S_0$ を加えた3つの状態について評価関数 $E=E_0+E_1+E_2+E_L+E_C$ を計算しこれを最小にする変数の組を求めた。この場合、ディセンタ公差は $\pm 201\mu\text{m}$ に、第1レンズの第1面の曲率半径公差は $\pm 0.645\%$ となった。 $S_0$ の状態のディセンタ公差の約5倍の公差になり、曲率半径については約10倍に増えているからより製造容易になる。

【0078】【実施例4 ( $\pm 0.2\text{mm}$ のレンズ厚み、レンズ間隔誤差)】これまでに述べたものはディセンタ誤差とレンズの曲率半径の誤差に関するものであった。次にレンズ厚みとレンズ間隔に誤差を与えて評価関数を作ってこれを最小化した。

【0079】

【表9】

実施例4のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表10          | 4.331         | 2.403 |
|       | S2  | -83.277      | 4.888         |       |
| L2    | S3  | -313.919     | 13.173        | 2.403 |
|       | S4  | 表10          | 164.581       |       |

【0080】

【表10】

実施例 4 の非球面データ

| 面番号 | $l/c$<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|---------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -37.641       | -0.075 | -5.120E-7  | 4.102E-10  | -1.307E-13 | -5.386E-16 |
| S4  | -56.159       | -0.489 | -4.947E-8  | 1.217E-10  | -2.974E-14 | 1.304E-18  |

【0081】誤差を与えた状態は6つある。第1レンズの厚みについて $\pm 0.2$  mmの誤差を付与した状態がS1、S2、レンズ間隔に $\pm 0.2$  mmの誤差を与えた状態がS3、S4である。第2レンズ厚みに $\pm 0.2$  mmの誤差を与えた状態がS5、S6である。そして、統合評価関数 $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_L + E_C$ を最小にするような変数の組を求めた。 $E_0$ を最小にするだけの変数の組の場合は、レンズ厚み、間隔の公差が $\pm 0.08$  mmであったが、6つの誤差を含む状態の統合評価関数を最小にする変数の組で

は、厚み間隔の公差が $\pm 0.23$  mmに増大した。公差が約3倍になっているのでより製造容易な訳である。

【0082】[実施例5 ( $\pm 0.02$  の屈折率誤差)] 第1レンズ、第2レンズともにZnSeの赤外光用の材料を使う。屈折率は2.403とするのが通常であるが、これに対して $\pm 0.02$  の屈折率誤差を付与した状態を考える。

【0083】

【表11】

実施例 5 のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表12          | 4.511         | 2.403 |
|       | S2  | -61.950      | 7.773         |       |
| L2    | S3  | -458.311     | 13.771        | 2.403 |
|       | S4  | 表12          | 161.354       |       |

【0084】

【表12】

実施例 5 の非球面データ

| 面番号 | $l/c$<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|---------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -37.381       | -0.080 | 4.417E-7   | 3.431E-10  | 8.272E-15  | 7.625E-17  |
| S4  | -71.995       | -1.055 | 8.115E-8   | 3.323E-12  | -7.892E-15 | 3.582E-18  |

【0085】S0は屈折率誤差のない状態である。S1は第1レンズの屈折率に $+0.02$ の誤差がある状態、S2は第1レンズの屈折率に $-0.02$ の誤差がある状態、S3は第2レンズの屈折率に $+0.02$ の誤差を与えた状態、S4は第2レンズの屈折率に $-0.02$ の誤差を与えた状態である。これらの5つの状態の評価関数を $E_j$  ( $j=0, \dots, 4$ )とする。統合評価関数 $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_L + E_C$ を最小にする光学変数を求めた。誤差を与えないS0を最小として求めた変数に対して屈折率公差は $\pm 0.00782$ であるが、統合評価関数を最小にする変数に対する屈折率公差は $\pm 0.0115$ であった。約5割増加している。

【0086】[実施例6 ( $\pm 0.2$  mmのレンズ厚み間隔誤差と $\pm 10$ 分のティルト誤差)] 実施例4のレンズ厚み、間隔に加えて、レンズのティルト誤差として $\pm 10$ 分を賦与したものを考える。実施例4ではレンズ厚み、間隔の公差が緩くなったが、逆にティルトの公差は従来法の $\pm 10.7$ 分に対し、実施例4で $\pm 3.8$ 分に厳しくなった。そこで、本実施例では、レンズ厚み、間隔に加えティルトの誤差も賦与して、それらすべての公差が増大することを示す。

【0087】

【表13】

実施例6のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm) | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率   |
|-------|-----|-----------|------------|-------|
| L1    | S1  | 表14       | 4.459      | 2.403 |
|       | S2  | -71.751   | 6.249      |       |
| L2    | S3  | -314.932  | 13.189     | 2.403 |
|       | S4  | 表14       | 163.439    |       |

【0088】

【表14】

実施例6の非球面データ

| 面番号 | 1/c (mm) | k      | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | $\alpha_5$ |
|-----|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -37.873  | 0.064  | 2.449E-7   | 2.461E-10  | 7.303E-13  | -8.252E-16 |
| S4  | -61.758  | -0.514 | 8.815E-8   | 4.215E-11  | 2.604E-15  | -8.652E-18 |

【0089】S1～S6は実施例4と同じである。S1、S2は第1レンズの厚みについて±0.2mmの誤差を付与した状態、S3、S4はレンズ間隔に±0.2mmの誤差を与えた状態である。S5、S6は第2レンズ厚みに±0.2mmの誤差を与えた状態である。S7は第1レンズに+10分のティルト誤差を賦与したものである。S8は第1レンズに-10分のティルト誤差を賦与した状態である。S9は第2レンズに+10分のティルト誤差を与えた状態、S10は第2レンズに-10分のティルト誤差を与えたものである。それらの評価関数として、E1～E10を対応させ、統合評価関数 $E = E_0$

+E1+……+E9+E10+EL+ECを考える。ティルト誤差を賦与していない評価関数 $E = E_0 + E_1 + \dots + E_6 + E_L + E_C$ の実施例4の場合ティルト公差は±3.8分であった。ここでティルト誤差±10分を加えると、ティルト公差が±8.1分に増加した。約2倍に増えているので製造容易である。レンズ厚み、レンズ間隔の公差は±0.25mmになった。

【0090】【実施例7（±5分のウエッジ誤差）】第2レンズのウエッジ誤差として±5分を設定した。

【0091】

【表15】

実施例7のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm) | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率   |
|-------|-----|-----------|------------|-------|
| L1    | S1  | 表16       | 3.500      | 2.403 |
|       | S2  | -49.165   | 8.444      |       |
| L2    | S3  | 無限大       | 9.976      | 2.403 |
|       | S4  | 表16       | 157.701    |       |

【0092】

【表16】

実施例7の非球面データ

| 面番号 | 1/c (mm) | k      | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | $\alpha_5$ |
|-----|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -31.575  | -0.257 | 1.359E-6   | 7.887E-10  | -2.193E-13 | 3.206E-16  |
| S4  | -79.449  | -1.711 | 6.460E-7   | -1.534E-10 | 1.126E-14  | 3.109E-19  |

【0093】S1は+5分のウエッジ誤差を賦与した状態である。S2は-5分のウエッジ誤差を賦与した状態である。従来法 $E_0$ だけの評価ではウエッジ誤差は±1.9分であった。 $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_L + E_C$ を最小にすることによってウエッジ公差が±2.7分に改善された。0.8分拡大するので製造容易になる。

【0094】【実施例8（屈折率分布の不均一性）】レ

ンズは一定の屈折率を持つと仮定して計算してきた。屈折率全体の揺らぎについては実施例5で±0.02の誤差を賦与したものを説明した。ここでは一様な屈折率の揺らぎではなくて空間的な不均一性を扱う。

【0095】

【表17】

実施例8のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm) | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率   |
|-------|-----|-----------|------------|-------|
| L1    | S1  | 表18       | 3.500      | 2.403 |
|       | S2  | -51.409   | 6.817      |       |
| L2    | S3  | 無限大       | 10.251     | 2.403 |
|       | S4  | 表18       | 157.629    |       |

【0096】

【表18】

実施例8の非球面データ

| 面番号 | 1/c (mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | -31.225  | -0.217 | 1.870E-6   | 1.242E-9   | -1.490E-13 | 3.946E-16  |
| S4  | -73.378  | -2.088 | 6.580E-7   | -1.582E-10 | 2.090E-15  | 1.325E-18  |

【0097】第2レンズにつぎの式で表現されるような半径に依存する屈折率不均一があるとすると、

【0098】

$$n = n_0 + A r^2 + B r^4 \quad (r = (x^2 + y^2)^{1/2}) \quad (12)$$

 $n_0 = 2.403$ 

S<sub>0</sub> は A=0、B=0 の屈折率均一状態である (n=n<sub>0</sub>)。S<sub>1</sub> は A=+5×10<sup>-7</sup>、B=-4×10<sup>-10</sup> の屈折率不均一の状態である。S<sub>2</sub> は A=-5×10<sup>-7</sup>、B=+4×10<sup>-10</sup> の屈折率不均一の状態である。S<sub>0</sub> だけの評価関数 E<sub>0</sub> を最小化したものでは屈折率不均一 (inhomogeneity) の公差が ±0.0000193 であった。本発明に従って、統合評価関数 E=E<sub>0</sub>+E<sub>1</sub>+E<sub>2</sub>+E<sub>3</sub>+E<sub>4</sub> を最小化して変数を最適化したものは、屈折率不均一性公差は ±0.0000267 に改善された。約4割公差が増大した事になる。

【0099】[実施例9 (非球面レンズ)] 次に単純な非球面レンズの集光レンズを例に、実施例1～8とは異なるパラメータに誤差を賦与して評価関数を設定し、それを最小化するような変数を求める事で、f-θレンズの場合同様公差が大きくなる事を示す。

【0100】(A) 初期レンズ設定。

レンズ枚数 1枚 材質 ZnSe (屈折率 n=2.403)

第1面は凸面の非球面、第2面は凹面の球面。

波長 10.6 μm

入射瞳径 φ50.8mm

入射角度 0度 (垂直入射のみ)

レンズは、ZnSe製でメニスカス形状を有し、第1面が非球面である。入射光は波長 10.6 μm の赤外光で平行光が垂直入射するのみである。

【0101】(B) 変数設定

第1、第2面の曲率半径、非球面係数 (k、α<sub>1</sub>、α<sub>2</sub>、α<sub>3</sub>、α<sub>4</sub>)、厚み、像面位置を変数とする。

【0102】(C) 拘束条件

焦点距離 95.25mm

レンズ厚み 3mm以上12mm以下

面精度の誤差 (Fringes Irregularity) を問題にする。

これは理想曲面からのズレである。波長 0.633 μm の He-Ne レーザを基準波長として適当な干渉計を用いて測定することができる。ズレの大きさを干渉縞の本数で表す。例えば図15に示すようにx軸方向とy軸方向の断面それぞれで曲率のズレがある場合を考える。ここでレンズの軸をz軸とし、z軸に垂直な面内にX軸、Y軸をとる。すなわち回転対称でないシリンダカルな歪が生じている。このとき、干渉縞は図16のようになる。縦方向と横方向の縞の本数の差を取って面の歪を表す。

【0103】

【表19】

従来例2のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径 (mm) | 厚み、間隔 (mm) | 屈折率   |
|-------|-----|-----------|------------|-------|
| L1    | S1  | 表20       | 5.518      | 2.403 |
|       | S2  | 184.565   | 91.359     |       |

【0104】

【表20】

従来例 2 の非球面データ

| 面番号 | $l/c$<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|---------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | 78.854        | -0.637 | 9.692E-8   | 2.658E-11  | -5.060E-14 | 4.251E-17  |

【0105】面精度誤差を含まない状態  $S_0$  のみを含めた評価関数  $E = E_0 + E_c$  を最小にする変数の組（従来例 2）では、面精度公差は  $\pm 2.97$  本であった。

【0106】本発明の思想に従って、 $\pm 5$  本の稿本数が現れるようなシリンドリカルな面精度誤差のある状態  $S$

1、 $S_2$  を仮定し、これらの評価関数  $E_1$ 、 $E_2$  を加えた統合評価関数  $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_c$  を最小にする変数を求めた（実施例 9）。

【0107】

【表 21】

実施例 9 のレンズデータ

| レンズ番号 | 面番号 | 曲率半径<br>(mm) | 厚み、間隔<br>(mm) | 屈折率   |
|-------|-----|--------------|---------------|-------|
| L1    | S1  | 表 22         | 5.519         | 2.403 |
|       | S2  | 157.562      | 91.092        |       |

【0108】

【表 22】

実施例 9 の非球面データ

| 面番号 | $l/c$<br>(mm) | k      | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----|---------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| S1  | 73.777        | -0.692 | 1.584E-7   | -9.697E-11 | 3.263E-13  | -2.681E-16 |

【0109】これによると面精度の公差は  $\pm 4.67$  本にまで改善された。

【0110】

【発明の効果】本発明は、光学パラメータのうち一つあるいは複数のパラメータ  $P_i$  について  $\pm \delta$  の誤差を含ませた状態  $S_1$ 、 $S_2$  … を考えこれらの評価関数  $E_1$ 、 $E_2$ 、… を無誤差状態  $S_0$  の評価関数  $E_0$  に加えた統合評価関数  $E_0 + E_1 + E_2$  … を作り、変数を変えながら、これを最小にする変数を探すようになっている。誤差を賦与した状態を考えたパラメータ  $P_i$  については公差が広がる。公差が大きくなるので製造容易になる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】レンズ設計法の概略説明図。

【図 2】平面波がレンズによって球面波に変換された場合の波面の変化を示す図。

【図 3】理想の波面からの実際の波面の食い違いが波面収差であることを説明する図。

【図 4】光学系変数の関数として性能が変動するが変数の変化が僅かな場合でも性能変化が大きい時と、変数変化が大きくても性能低下が少ない時があることを説明する図。

【図 5】光学系の性能が製造誤差とともに減少するが性能低下がある基準値までは許容されるとしその誤差を公差とする事を説明するグラフ。

【図 6】従来法に従って、誤差を与えない評価関数  $E_0$  で光学パラメータを決定した時は公差が小さくなること

を説明する図。

【図 7】本発明の思想に従っていくつかのパラメータに誤差を与えて、誤差を含む状態の評価関数を、誤差を含まない評価関数に加えた統合評価関数を最小にするようにパラメータを選んだ場合に公差が広がり、製造容易になることを説明する図。

【図 8】誤差を賦与しない状態の評価関数  $E_0$  を最小にすることによって光学パラメータを求める従来法の手順を説明する図。

【図 9】 $\pm \delta$  のディセンタ誤差を賦与した状態の評価関数  $E_1$ 、 $E_2$  を、誤差を与えない状態の評価関数  $E_0$  に加えた統合評価関数を作りこれを最小化することによってパラメータを決める本発明の手順を説明する図。

【図 10】誤差を与えない状態の評価関数を最小化してパラメータを決定する従来の方法によると、製造誤差がわずかであっても収差の増加が著しくて公差が広く取れないということを説明するグラフ。横軸は製造誤差でありさまざまなパラメータの誤差を纏めて表現している。

【図 11】誤差を与えた状態の評価関数と誤差のない状態の評価関数とを加えた統合評価関数を最小化してパラメータを決定する本発明の方法によれば、製造誤差が多少有っても収差の増加は僅かであり、公差を広くとれることを説明するグラフ。横軸は製造誤差でありさまざまなパラメータの誤差を纏めて表現している。縦軸は収差であるがこれは性能一般に拘る収差を示し光線追跡に於ける位置のズレや波面収差など適当な収差を選ぶことが

できる。

【図 1 2】誤差を賦与した状態についての評価関数を用いる本発明の設計方法の流れを説明する図。

【図 1 3】2枚のレンズの軸がずれた状態を示す図。これがディセンタ誤差である。

【図 1 4】(1)は2枚のレンズのうち一方のレンズ光軸が傾いた状態を示す図。ティルト誤差である。(2)はレンズの厚みが均一でなくて楔型に変化している状態を示す図。これがウエッジである。

【図 1 5】シリンドリカルな面の歪を示すグラフ。実線は理想のレンズ曲面を示し、破線が実際のレンズ曲面を示す。曲面であるから2次元的な広がりをもつ。ここでは $xz$ 断面と、 $yz$ 断面をしめす。 $y$ 方向には理想曲面どおりであるが、 $x$ 方向には理想曲面からずれているという有り様を示す。

【図 1 6】図 1 5 のような $x$ 方向に曲面のずれをもつレンズのHe-Neレーザ(波長 $\lambda = 0.633\mu\text{m}$ )による干渉縞を示す。

【図 1 7】第1面が凸面(非球面)、第2面が凹面(球面)である非球面レンズにおいて平行光が一点に収斂さ

れることを示す図。

【図 1 8】 $f-\theta$ レンズにおいて0度、8度、16度の入射角度でレンズに入射した光が像面上にそれぞれ異なる位置へ収斂される様子を示す図。

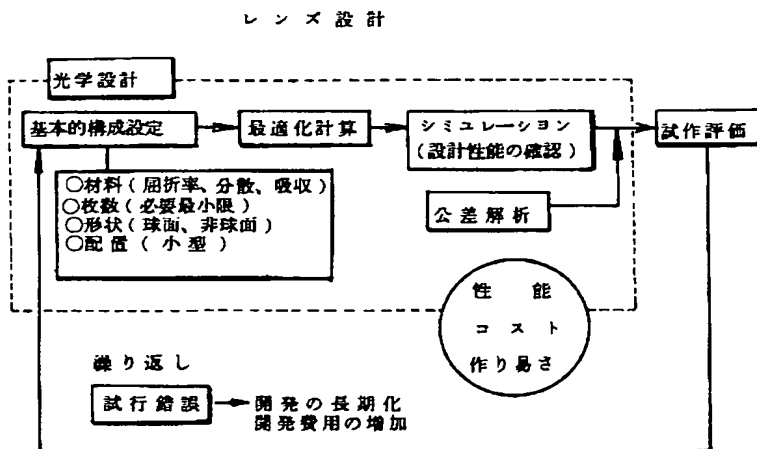
【図 1 9】 $f-\theta$ レンズの実施例に於いて入射瞳内に18本の光線を取る例を示す図。

【図 2 0】従来法にしたがって誤差を与えない状態 $S_0$ の評価関数 $E_0$ を最小にすることによって求められた光学パラメータによって決定される $f-\theta$ レンズに $160\mu\text{m}$ のディセンタ誤差を与えた場合に、 $0^\circ$ 、 $8^\circ$ 、 $16^\circ$ の各入射角度について像面上での集光スポットの強度分布を等高線によって示す図。

【図 2 1】本発明にしたがって、ディセンタ誤差を与えた誤差状態の評価関数 $E_1$ 、 $E_2$ を、誤差を与えない状態 $S_0$ の評価関数 $E_0$ に加えた統合評価関数 $E$ を最小にすることによって求められた光学パラメータによって決定される $f-\theta$ レンズに $160\mu\text{m}$ のディセンタ誤差を加えた場合に、 $0^\circ$ 、 $8^\circ$ 、 $16^\circ$ の各入射角度について像面上での集光スポットの強度分布を等高線によって示す図。

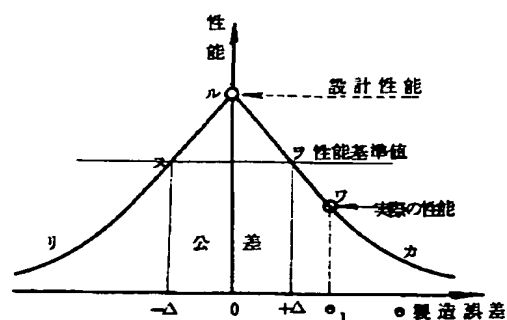
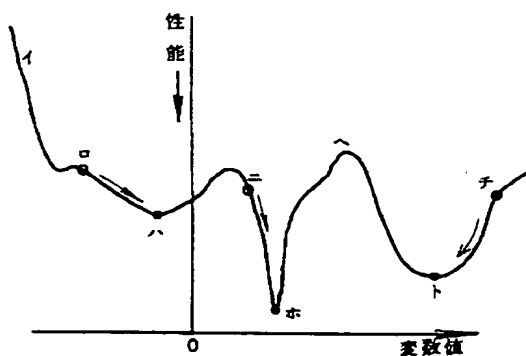
【図 1】

【図 2】

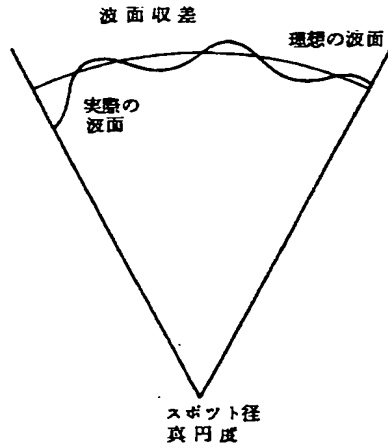


【図 4】

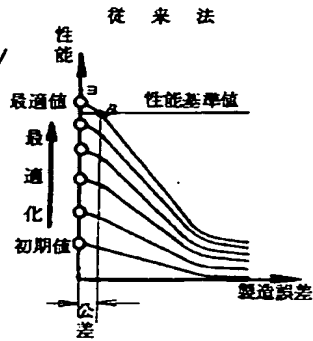
【図 5】



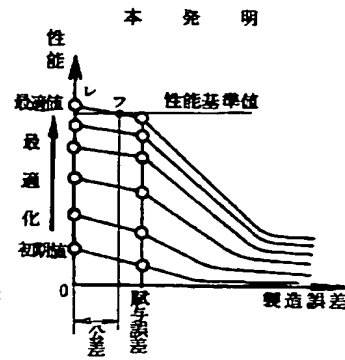
【図3】



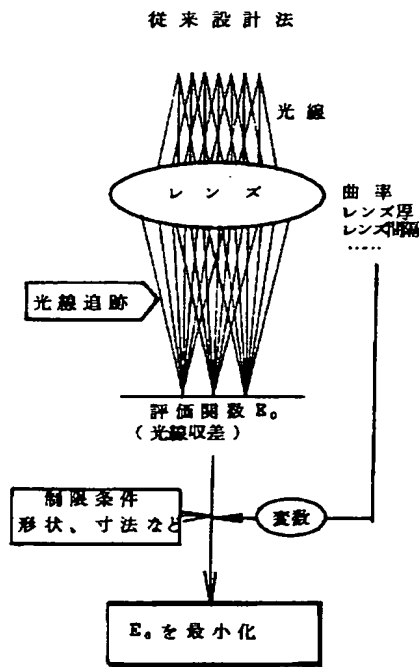
【図6】



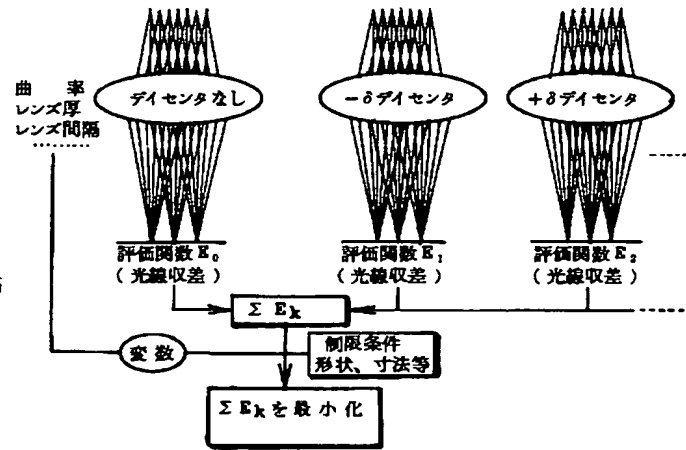
【図7】



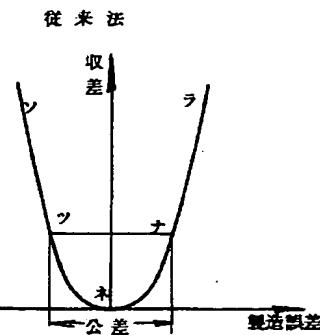
【図8】



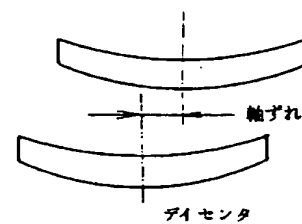
【図9】



【図10】



【図13】



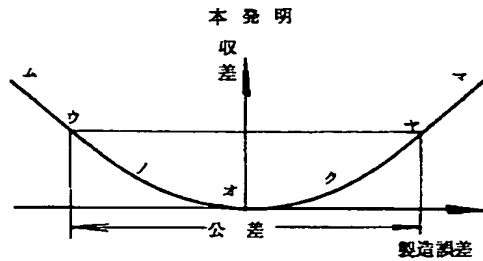
【図20】



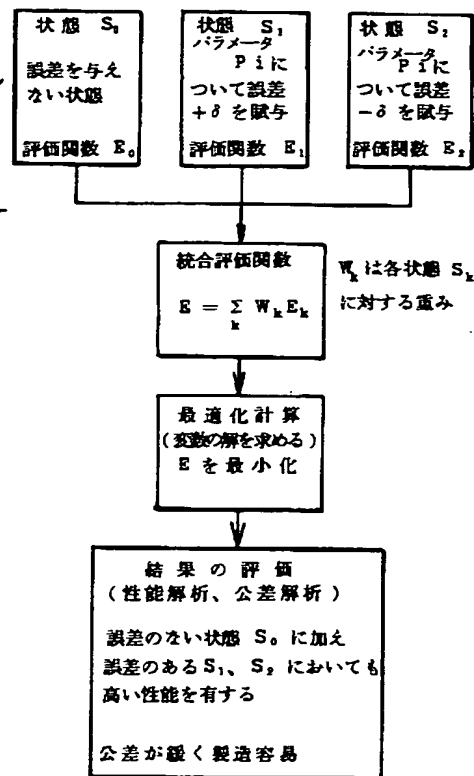
【図21】



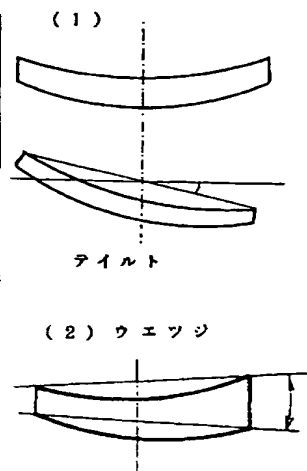
【図 11】



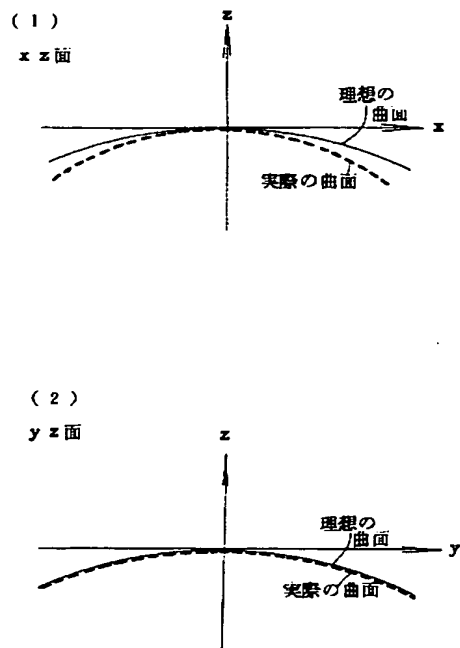
【図 12】



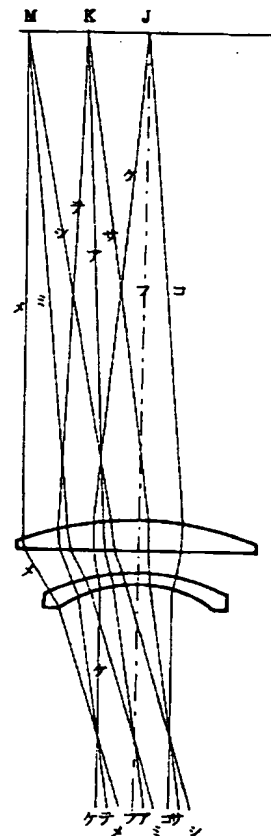
【図 14】



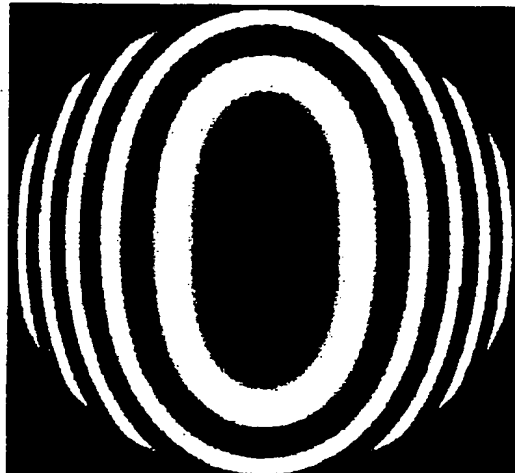
【図 15】



【図 18】



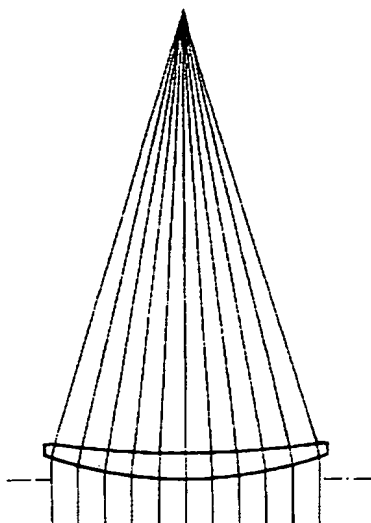
【図 16】





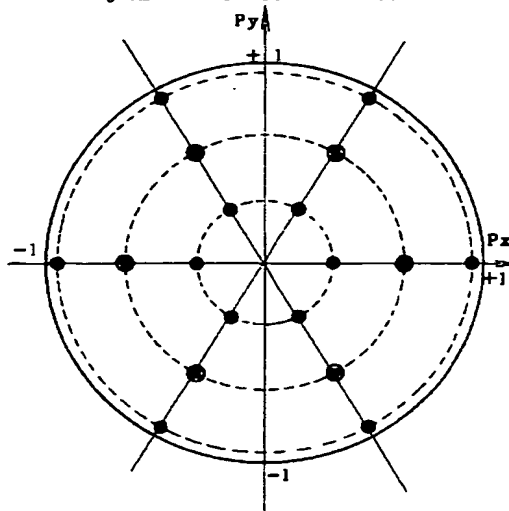
【図 1 7】

非 球 面 レ ン ズ



【図 1 9】

3 Rings  $R = 0.3357, 0.7071, 0.9420$   
6 Arms  $\theta = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ$



●  $w = 0.048481$  12 本

⊙  $w = 0.07757$  6 本